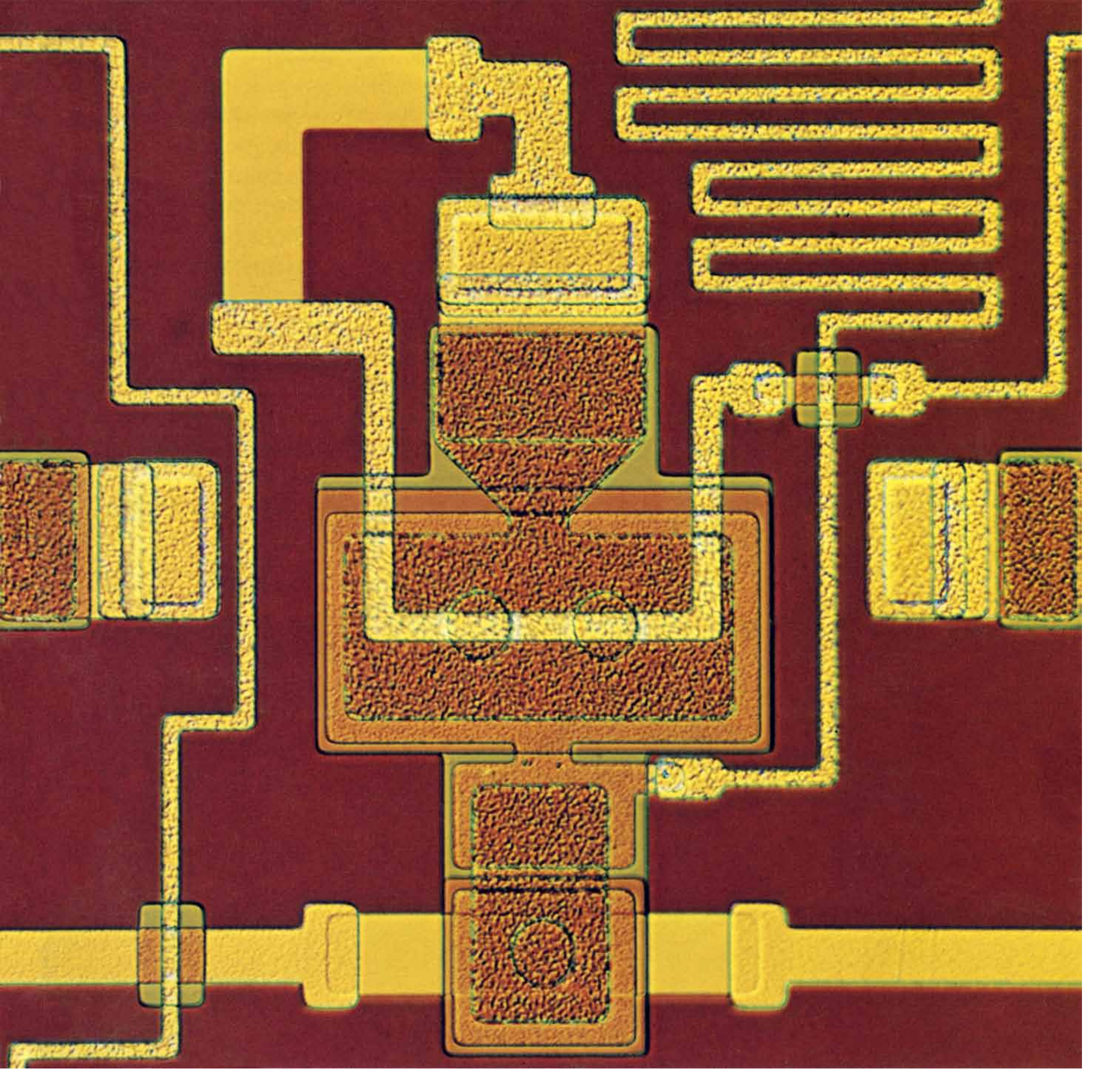
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



EL COMPUTADOR SUPERCONDUCTOR

Julio 1980

250 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 46
Julio 1980

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

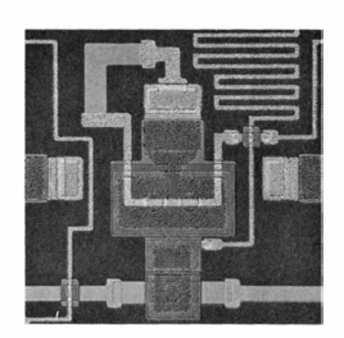
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Antonio Creus: *El computador superconductor;* Marina Ramón: *La gravedad en la teoría cuántica;* Cristóbal Mezquita: *Mielina;* Miquel Gich: *Evolución química del manto terrestre;* Ramón Fontarnau y Frances E. Lynd: *Cinemática del crecimiento vegetal;* Francisco P. Silva: *Los orígenes de la minería del cobre en Europa;* Ramón Pascual: *El asunto de los rayos N;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Tito A. Varela, Silverio Palafox y Cristóbal Mezquita



LA PORTADA

La fotomicrografía de la portada muestra parte de un dispositivo microelectrónico en cuyo circuito básico los elementos no son semiconductores sino superconductores. Tales aparatos operan a una velocidad extremadamente rápida y disipan muy poca energía, cualidades que les hacen muy adecuados para su empleo en un computador digital de alta velocidad (véase "El computador superconductor", por Juri Matisoo, en este mismo número). La función de conmutación, esencial en cualquier computador digital, se realiza por uniones Josephson, cuya operación depende de dos fenómenos de la mecánica cuántica: la superconductividad y el "efecto túnel" de los electrones a través de una barrera aislante. Las uniones, visibles aquí como formas circulares dentro de los rectángulos de color marrón oscuro, constan de dos superconductores dispuestos uno encima del otro y separados por una delgada capa de aislante interpuesta. Los superconductores, que pueden reconocerse por su brillo metálico, están fabricados con aleación de plomo.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 2.750 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 43 U.S.$
Ejemplar atrasado ordinario:
280 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
420 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239, Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.°, 2.ª, Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada de Fritz Goro

Página	Fuente
8	Juan F. Gallardo
9-16	Juan F. Gallardo y Miguel Alonso
19	Fritz Goro
20-27	Gabor Kiss
28	International Business Machines Corporation (*arriba, izquierda*), Gabor Kiss (*arriba, derecha y abajo*)
29-34	Gabor Kiss
37	Fritz Goro
38-46	Dan Todd
53	Cedric S. Raine
54-58	Tom Prentiss
59	Albert Miller
60	Cedric S. Raine y Dikran S. Horoupian (*izquierda*), Albert Miller (*derecha*)
61-62	Cedric S. Raine
67	National Aeronautics and Space Administration U.S. Geological Survey, EROS Data Center
68-76	Andrew Tomko
81	Roger D. Meicenheimer
82-83	Ilil Arbel
84	Robert Walker
85	Ralph O. Erickson
86-88	Ilil Arbel
89	Ralph O. Erickson
90-92	Ilil Arbel
95	Patricia J. Wynne
96	Patricia J. Wynne (*arriba*), Borislav Jovanović (*abajo*)
97-99	Borislav Jovanović
100	Patricia J. Wynne
103-104	Gabor Kiss
105	Archivos de la Academia Francesa de Ciencias
106	Universidad Johns Hopkins
107	Gabor Kiss
110-114	Ilil Arbel
116-121	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Imprime Grafesa. Nápoles, 249
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Cartas

Señor Director:

Me permito exponer una consideración sobre cierta afirmación de Antonio Fontdevila publicada en el número de la revista correspondiente al mes de marzo de 1980, página 139. El término *parásito* (o *parasito*) está bien fijado en lengua española (o castellana), así como en otras lenguas europeas: inglés y francés (*parasite*), alemán (*Parasit*), italiano (*parassito*), etc. Sin embargo, no parece haber todavía acuerdo sobre el nombre que debemos dar, en español, a un ser vivo atacado por un parásito.

Los demás idiomas neolatinos lo tienen ya resuelto: francés *(hôte)*, italiano *(oste)*, etc., por derivación natural del latín *(hospes*, ac. *hospitem*, gen. *hospitis)*. Las lenguas germánicas han optado, alternativamente, por la posición innovadora del inglés *(host*, del antiguo francés *hoste*, introducido en la época de la influencia normanda y a su vez descendiente del latín *hospes)* o por la conservadora del alemán (*Gastgeber*, el que da alojamiento). El término alemán *Gast* deviene, como el inglés *guest* (éste a través del antiguo inglés *giest*), del germánico común, en ambos casos con semántica de "invitado".

Si en español siguiéramos la corriente general de las lenguas de nuestra estirpe, deberíamos adoptar el término *huésped*, que es nuestra forma del latín *hospes*. Bien es verdad que para los romanos esta palabra se usaba indistintamente para el invitador y para el invitado. Sin embargo, cuando *huésped* se usa con el correlativo *parásito* ya no da ninguna posibilidad de equívoco. Entonces no parece necesario —ni etimológica, ni comparativa, ni pragmáticamente— recurrir a "inventar" términos más o menos forzados, del tipo de *hospedador, hospedero, hotelero, anfitrión* u otros.

Basándome en estos hechos lingüísticos, me permito opinar que la afirmación de Fontdevila (INVESTIGACION Y CIENCIA, marzo de 1980, página 139) de que "es un error traducir del inglés al español *host* por *huésped*" es, cuando menos, exagerada. Precisamente ésta es la traducción literal.

Por si la lingüística fuera poco, quizá fuera interesante recordar que, para Don Miguel de Cervantes, el huésped no era quien dormía en una venta, sino el ventero. Y para nuestro gran zoólogo Angel Cabrera el huésped no era el parásito sino el parasitado.

Queda claro que, en español, como en las demás lenguas europeas, tampoco hay ni la más mínima posibilidad de error. En todo caso, sólo el uso, y nunca el dogmatismo, inclinaría la balanza en otro sentido que nos alejase de nuestras raíces.

CARLOS JOSÉ HERNÁNDEZ DÍAZ

Doctor en Biología, Catedrático,
Colaborador del C.S.I.C.

Señor Director:

Agradezco las puntualizaciones lingüísticas de Carlos José Hernández Díaz, que sin duda contribuirán a fijar en español el término biológico que debe asignarse a un ser vivo que aloja a un parásito.

No voy a entrar en una polémica lingüística que cae algo fuera de mi interés profesional. Sin embargo, he de recordar que las lenguas evolucionan y no necesariamente debido a la edición de diccionarios. En éstos la palabra huésped tiene tanto el significado de persona alojada en casa ajena, como el de persona que hospeda (hospedador) en casa a uno (Casares, 1975). Sin embargo, y aún admitiendo que los romanos usaran indistintamente *hospes* para ambas situaciones y que para Cervantes huésped fuera exclusivamente sinónimo de ventero, es difícil negar el hecho de que *en la actualidad* la palabra huésped es utilizada por la gran mayoría de los hispanoparlantes para designar al hospedado y no al hospedador.

Es un hecho que gran parte de la terminología científica se introduce en nuestra lengua a través de traducciones. En este caso ha podido suceder así, y aunque "host" tiene en inglés el significado claro de hospedador (Chambers's Twentieth Century Dictionary. Editor William Geddie. W & R Chambers Ltd. Edimburgo y Londres 1966), se ha preferido utilizar en muchas traducciones el término *ambiguo* de huésped. Afortunadamente, en ecología contamos al menos con una autoridad que ha escrito una obra actual originariamente en español. En ella (Ramón Margalef: *Ecología*, Ediciones Omega, Barcelona 1974) se utiliza el término hospedador, y nunca el de huésped, para designar el patrón de un parásito.

Soy el primero en reconocer el interés y el respeto que debe darse a la lingüística, pero como profesional de la biología estoy mucho más preocupado por la claridad de los términos científicos que por sus raíces. Cuando éstas se prestan a confusión, como es el caso del término "huésped", me inclino siempre por la denominación más precisa. Estoy de acuerdo en que el uso debe ser quien consagre los términos científicos y, en este sentido, espero que la palabra hospedador llegue a generalizarse en beneficio de la comunicación científica en lengua española.

ANTONIO FONTDEVILA VIVANCO

Catedrático de Genética
Santiago de Compostela

Señor Director:

En el artículo "Escarabajos cornudos" (de W. G. Eberhard, mayo de 1980) el autor describe el comportamiento asociado a la presencia de estructuras en forma de cuernos en determinados coleópteros, en especial la lucha intraespecífica entre machos, mediante la cual se dirime la posesión de la hembra, de una madriguera o de otro recurso por el que se compite.

Al final del artículo el autor señala la analogía (aunque este término no aparece en el texto) entre los cuernos de los coleópteros y los de los ungulados ("cuernos" en sentido amplio, pues incluyen estructuras tales como los colmillos), y las diferencias en la función de tales estructuras en los dos grupos de animales. Después de señalar que "hay varias razones para estas diferencias", el autor enumera únicamente dos, a saber:

1) "...el recubrimiento duro... que protege el cuerpo de un escarabajo hace que acornear resulte una forma de ataque completamente *ineficaz* para los coleópteros. Y a la inversa, la vulnerabilidad del cuerpo de los mamíferos hace que utilizar los cuernos como palanca para levantar al contricante,... la función... de los cuernos de los escarabajos, sea *menos ventajoso* para los ungulados."

2) "Embestir parece un comportamiento *ventajoso* únicamente para aquellos animales que son capaces de movimientos sobre el suelo, rápidos y bien dirigidos, y mientras que los ungulados con cuernos..." proceden de animales de "...movimientos rápidos y ágiles, los escarabajos suelen ser lentos y torpes."

Estos dos argumentos, que no tienen por qué ser falsos, pueden tildarse sin embargo de secundarios al tema que se debate, sino de deterministas. A mi entender, las explicaciones son válidas únicamente si los adjetivos que he subrayado se sustituyen por otros: *imposible*

(para ineficaz, menos ventajoso) y *posible* (para ventajoso).

Es decir, la estructura de artrópodo marchador típica de un coleóptero impone unos límites físicos a su tamaño y las capacidades mecánicas que su cuerpo, considerado como una máquina, puede desarrollar. La palanca necesaria para levantar a un contricante ungulado precisaría de un tamaño del cuerpo y de una estructura de los cuernos incompatibles con la idea que tenemos de un ungulado; y a la inversa, para que un escarabajo fuera capaz de acornear habría que postular una masa mayor, un metabolismo exacerbado y, sólo secundariamente, el recubrimiento del cuerpo menos resistente (los rinocerontes acornean y, curiosamente, poseen también una coraza notable; pero son homeotermos).

Estas últimas consideraciones se aplican también al segundo punto. La energía necesaria para mover el cuerpo, la inercia que éste debe tener y la velocidad que debe alcanzarse para embestir están reñidas con la organización de un artrópodo marchador, que es poiquilotermo por definición.

Incidentalmente, y aprovechando que en el último párrafo del artículo se cita a Darwin elucubrando sobre el aspecto que tendría un macho de *Chalcosoma* que alcanzara "...el tamaño de un perro o un caballo...", me apresuro a elucubrar a mi vez que tal aspecto no sería "imponente", sino deplorable. Y ello por la misma razón que una pulga salta más largos de cuerpo que un caballo, y la razón de tamaños de las patas al cuerpo de un elefante no es la misma que la razón de las patas al cuerpo en un ratón, etcétera, etcétera.

Es decir, lo que pueden hacer o no coleópteros y ungulados con sus cuernos depende, primero, de la física, y sólo después de la selección natural. Ciertos animales no existen ni han existido jamás por "casualidad" (como los Rinógrados de Stümpke, *Bau und Leben der Rhinogradentia*), mientras que otros no existen ni han existido jamás por imposibilidad física (como los ungulados de Riedl, *Die Ordnung des Lebendigen: Systembedingungen der Evolution*). Los Rinógrados son tan improbables como el pulpo, el topo de nariz estrellada y el elefante; los ungulados de Riedl lo son tanto como el rizo de M. C. Escher (véase la sección *Juegos matemáticos* de INVESTIGACION Y CIENCIA de agosto de 1978).

JOANDOMÈNEC ROS

Departamento de Ecología,
Facultad de Biología,
Universidad de Barcelona

Los autores

. J. GALLARDO LANCHO ("El humus") inició y finalizó sus estudios de ciencias en la Universidad de Salamanca. Se licenció en 1969 y en 1972 presentó su tesis doctoral, que versó sobre materia orgánica en suelos del oeste de España. Durante el curso 1973/74 permaneció en la Universidad de Nancy I, Francia, donde obtuvo el diploma de estudios avanzados en pedología. De regreso a España se incorporó en 1975 al Centro de Edafología y Biología Aplicada de Salamanca, del CSIC, y el mismo año fue nombrado profesor agregado de la Universidad de Salamanca. En 1976 frecuentó durante nueve meses el "Geological Survey" de Denver (Colorado) donde investigó sobre sustancias húmicas de suelos y aguas. De nuevo en España, promovió la formación del "Grupo de Estudios de Humus" del CSIC, que agrupa a los investigadores españoles que trabajan sobre materia orgánica del suelo.

JURI MATISOO ("El computador superconductor") es ingeniero jefe del programa "Tecnología del Computador Josephson" en el Centro de Investigación Thomas J. Watson, de la International Business Machines Corporation (IBM). Empezó a trabajar para IBM cuando estudiaba en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde se licenció en 1960. Tras un año en la industria, entró en la Universidad de Minnesota para cursar estudios complementarios, doctorándose en 1964. Ese mismo año regresó a IBM, interesándose por el efecto Josephson, recién descubierto entonces. Reconociendo su potencial de aplicación a los computadores, concibió circuitos y aparatos de computador basados en dicho efecto. En 1978 recibió el premio Jack A. Morton del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), otorgado a las contribuciones prominentes en el campo de los aparatos de estado sólido.

DANIEL M. GREENBERGER y ALBERT W. OVERHAUSER ("La gravedad en la teoría cuántica") enseñan física en el City College de la Universidad municipal de Nueva York y en la Universidad de Purdue, respectivamente. Greenberger se graduó en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1954 y se doctoró por la Universidad de Illinois en 1958. Ha sido profesor en la Universidad estatal de Ohio y en la de California en Berkeley, y, profesor visitante, en las de Oxford y Washington. Overhauser se graduó en 1948 y se doctoró en física en 1951 por la Universidad de California en Berkeley. Tras dos años de labor postdoctoral en la Universidad de Illinois enseñó durante varios años en la Universidad de Cornell. En 1958 ingresó en la plantilla de investigadores de la Compañía Ford, donde llegó a dirigir el laboratorio de ciencias físicas. Desde 1973 pertenece al claustro de la Universidad de Purdue.

PIERRE MORELL y WILLIAM T. NORTON ("Mielina") son, respectivamente, profesor de bioquímica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Carolina del Norte y profesor de neurología (neuroquímica) de la Facultad de Medicina Albert Einstein de Nueva York. Morell siguió el camino de muchos otros científicos americanos graduándose en la Bronx High School of Science y en la Universidad de Columbia. Obtuvo el grado de doctor en 1968 en la Facultad de Medicina Albert Einstein. "Mi interés por la neuroquímica", escribe, "fue estimulado por mi formación postdoctoral en la Universidad de Michigan y, ulteriormente, por contactos con miembros del departamento de neurología de la Einstein, a la que volví como profesor". Morell se trasladó a la Universidad de Carolina del Norte en 1972. Norton nació y se educó en Maine, graduándose en el Bowdoin College en 1950. Obtuvo el doctorado en química orgánica por la Universidad de Princeton.

R. K. O'NIONS, P. J. HAMILTON y NORMAN M. EVENSEN ("Evolución química del manto terrestre") iniciaron su labor investigadora conjunta en el observatorio geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia. O'Nions y Hamilton se encuentran actualmente en la Universidad de Cambridge, donde el primero es profesor de investigación de la Royal Society y, el segundo, investigador asociado en el departamento de mineralogía y petrología. Evensen enseña geología en la Universidad de Toronto. O'Nions realizó sus estudios en la Universidad de Nottingham, doctorándose en geoquímica por la Universidad de Alberta en 1969. Desarrolló su labor docente en la Universidad de Oxford hasta 1975, en que inició una colaboración de cuatro años con el Lamont-Doherty. Hamilton se licenció en el King's College de la Universidad de Londres en 1972, alcanzando el grado de doctor por la de Oxford en 1975. Desde entonces se halla en el Lamont-Doherty. Evensen se graduó y doctoró en la Universidad de Minnesota. Desde 1974 ha permanecido en el Lamont-Doherty.

RALPH O. ERICKSON y WENDY KUHN SILK ("Cinemática del crecimiento vegetal") son, respectivamente, profesor de botánica en la Universidad de Pennsylvania y profesor adjunto de hidrología en la Universidad de California en Davis. Erickson obtuvo su licenciatura por el Gustavus Adolphus College en 1935 y su doctorado por la Universidad de Washington en 1944. Enseñó en la Universidad de Rochester durante tres años, antes de integrarse en el equipo docente de Pennsylvania en 1947. Silk se graduó en el Harvard College en 1968, comenzó su labor de graduado en la Universidad de Pennsylvania, la completó en la Universidad de California en Berkeley, donde se doctoró en botánica, y volvió a Pennsylvania para su trabajo postdoctoral.

BORISLAV JOVANOVIĆ ("Los orígenes de la minería del cobre en Europa") es asesor científico del Instituto de Arqueología de Belgrado. Se formó en la Universidad de Belgrado, donde alcanzó el doctorado en 1964. Además de escribir una serie de monografías sobre arqueología yugoslava, ha dirigido numerosas excavaciones. Actualmente colabora en la preparación de un plan de protección para monumentos arqueológicos en la región de la central eléctrica Djerdap II, sobre el Danubio, entre Yugoslavia y Rumania. Jovanović escribe: "Puesto que el Danubio ha sido siempre y todavía es una vía muy importante de comunicación en Europa, estas excavaciones, como las de Djerdap I, aportarán datos muy interesantes y nuevos sobre la historia cultural del sudeste de Europa".

IRVING M. KLOTZ ("El asunto de los rayos N") ocupa la cátedra Morrison de química en la Northwestern University y dicta un seminario de iniciación sobre composición inglesa en el mismo centro. Ha estado en la Northwestern desde 1940, el año en que se doctoró por la Universidad de Chicago. "Mi investigación principal en las últimas décadas", escribe, "trata de cuestiones de estructura molecular y del comportamiento funcional de macromoléculas de interés biológico. Estas investigaciones se dirigen principalmente al descubrimiento de reglas generales de estructura y comportamiento, pero ocasionalmente se focalizan en un objetivo práctico específico".

Hace...

José M.ª López Piñero

... cuatrocientos años

Falleció en Zaragoza Juan Tomás Porcell, principal responsable de la conversión de la lesión anatómica en criterio epidemiológico con sus autopsias sistemáticas de apestados.

Nacido en la ciudad de Cagliari en 1528, estudió en varias universidades españolas. Cursó medicina en la de Salamanca, donde fue discípulo de Lorenzo de Alderete, al que cita con gran elogio en su obra. También tuvo ocasión de asimilar la morfología vesaliana a través del magisterio de Cosme de Medina, el discípulo del valenciano Luis Collado que ocupó la cátedra de anatomía salmantina, creada en 1551, durante diez cursos académicos. Terminada su formación, "escogí por el mejor y más famoso lugar en donde hubiese de hacer mi asiento y morada, la famosa y leal ciudad de Zaragoza". En 1564, la capital aragonesa sufrió una grave epidemia de peste. Debido a la muerte o enfermedad de los médicos titulares, Porcell fue entonces encargado por los jurados de dicha ciudad de la asistencia a los apestados en el Hospital de Nuestra Señora de Gracia. Con ayuda de cuatro cirujanos, la organizó con unos criterios que reflejan ya su mentalidad innovadora. Sabemos que "los visitaba y curaba a todos dos veces al día, tres y cuatro horas por la mañana y otras tantas por la tarde... viendo algunas orinas, tocando los pulsos y tumores, siquiera apostemas, y hallándose siempre presente al tiempo de curar y nunca consentir que curen los cirujanos sin que el médico esté presente". Llevaba un cuidadoso registro de los casos, en un "cartapacio hecho por orden de abecedario, escribiendo y notando los que se habían muerto, y a cuántos días de su dolencia y abertura (del absceso) se habían muerto; y si se habían muerto por haberlos abierto antes de tiempo, o por qué y cómo; y los que se habían de purgar por cámara para minorar su materia, y todos los remedios que se les hacía y todo lo demás que era necesario". Tan minucioso registro, que constituye por sí solo una interesante aportación a los orígenes de la documentación clínica y epidemiológica moderna, lo utilizó, además, para reunir datos estadísticos, a los que recurrió para fundamentar sus criterios terapéuticos.

Lo más destacable de su labor fue, sin embargo, el uso que hizo de la indagación anatomopatológica como clave del conocimiento de la naturaleza de la enfermedad y como base de la orientación de su tratamiento. Formado en el ambiente del movimiento vesaliano español que había partido de Pedro Jimeno y Luis Collado, Porcell no era solamente un entusiasta de la nueva anatomía, sino también de sus aplicaciones a la medicina. Contaba con una notable experiencia de disector —"pasan de cincuenta anatomías las que hasta hoy ha hecho"— y tenía incluso la intención de escribir un tratado anatómico "en diálogo", que no llegó a publicar. Por otra parte, no hay que olvidar la tradición que la práctica de autopsias tenía en el propio Hospital de Nuestra Señora de Gracia desde finales del siglo XV, que se mantendría después viva hasta el período contemporáneo. En la epidemia citada, el médico sardo realizó autopsias sistemáticas de apestados por primera vez en la historia. Se basó todavía en los supuestos humoralistas del galenismo, con la pretensión de conocer "la realidad de la verdad, por haber abierto y hecho anatomías en cuerpos diferentes que se han muerto de dicho mal, y haber visto al ojo y claramente conoscido el humor malo y predominante, sus asientos y origen, y a qué parte inclinaba, y las causas de los grandes y bravos accidentes que consigo traía".

La mentalidad de Porcell corresponde al llamado galenismo "hipocratista", tendencia surgida en el seno del humanismo médico que, sin cuestionar la validez del sistema de Galeno, convirtió a Hipócrates en modelo de observación clínica objetiva, subrayando la importancia de ésta como uno de los fundamentos de la medicina. Lo mismo que Francisco Valles y otros seguidores españoles de dicha corriente, Porcell asoció el interés por la nueva morfología con el paso a primer plano de la experiencia clínica. Quiso hablar, "según la experiencia por haber visitado... los pobres enfermos de peste", llegando a superar claramente el criterio de autoridad. Procuró confirmar los síntomas de la peste "con autoridades de Hipócrates y Galeno... aunque bastaría decirlo yo, no porque sea yo más que los otros, antes bien soy el más mínimo de todos, sino por haberlos visto y notado muchas infinitas veces y más que todos juntos".

El resultado de su labor lo expuso Porcell en un libro titulado *Información y curación de la peste de Zaragoza, y preservación contra peste en general*, que apareció impreso en la capital aragonesa en 1565. Dedicado a Felipe II, es un volumen de casi 250 páginas en las que expone de modo sistemático las cuestiones relacionadas con la "naturaleza", la clínica, la terapéutica, la prevención y la asistencia de la terrible enfermedad. Ofrece una descripción nosográfica de la peste de carácter "moderno", en cuanto está basada en la generalización de lo que había observado en su propia casuística clínica y en las cinco autopsias de apestados que practicó, cuyos resultados explica detalladamente. Propone también un "modo de curar", apoyado en los mismos fundamentos, radicalmente distintos de las indicaciones tradicionales, oponiéndose a medidas como las sangrías, las purgas y la apertura intempestiva de los abscesos. Llega a utilizar, como hemos dicho, argumentos estadísticos en defensa del avance que significa su nueva pauta terapéutica.

Carece de fundamento la noticia, procedente de Hernández Morejón, según la cual Porcell volvió a Cerdeña después de publicar su libro, porque estaba de paso en Zaragoza. Esto último resulta incompatible con su declaración de que había escogido la capital aragonesa como "asiento y morada". Gracias a un documento dado a conocer por Nicasio Mariscal, sabemos, además, que Porcell permaneció en Zaragoza, donde fue uno de los dos profesores que explicaron medicina en el Estudio que precedió a la organización de una auténtica Universidad por Pedro Cerbuna en 1583. Poco antes murió, como hemos dicho, en la misma ciudad.

A pesar de que la *Información y curación de la peste* no fue reeditada ni traducida, tuvo un notable influjo en España e Italia. Entre los autores que recogieron sus aportaciones anatomopatoló-

Juan Tomás Porcell, practicando una autopsia a una apestada. Xilografía que figura en su libro **Información y curación de la peste de Zaragoza** *(1565)*

gicas figuran el gran anatomista italiano Giovanni Filippo Ingrassia (1576) y el sevillano Juan Carmona (1588). Según Carreras Panchón, en un informe de los médicos de Génova sobre la peste escrito hacia 1631 se cita todavía como autoridad a Porcell, "spagnolo, pratichissimo in cosi simili". Para situar su contribución, resulta asimismo interesante recordar que el holandés Ysbrand van Diemmerbroeck, el más celebrado de los tratadistas de peste en la Europa del siglo XVII, rehusó anatomizar cadáveres de fallecidos en la epidemia de Nimega de 1631, por miedo al contagio. Aunque antes que Porcell se habían realizado de modo esporádico autopsias de apestados, su práctica con una intención sistemática equiparable a la del médico sardo no se difundió hasta bien entrado el siglo XVIII.



El humus

Aunque pisoteada y menospreciada, la materia orgánica superficial del suelo regula en gran medida la nutrición de la humanidad. El humus constituye un índice adecuado para caracterizar los suelos

Juan F. Gallardo

Se ha calculado que existen unos 700.000 millones de toneladas métricas de carbono, en forma de dióxido de carbono, en la atmósfera terrestre, en tanto que otros 827.000 millones de toneladas métricas de carbono se encuentran inmovilizadas como biomasa vegetal que se desarrolla sobre las tierras emergidas. El paso de una forma a otra se halla regulado a través de la fotosíntesis de las algas y plantas verdes, que aprovecha alrededor del uno por ciento de la energía solar que llega a nuestro planeta, y la respiración de todos los organismos vivientes que en él habitan. Esto presupone la existencia de un equilibrio dinámico, con un intercambio anual de 50.000 millones de toneladas métricas de carbono. Sin embargo, dicho equilibrio no es perfecto, y cada año se sustraen de la atmósfera alrededor de unas 500 millones de toneladas de materia orgánica; ello ha conducido a una acumulación, a través de las épocas geológicas recientes, de alrededor de un billón (10^{12}) de toneladas métricas de materia orgánica en la capa más superficial de la tierra, el suelo; lo cual representa una reserva energética tan inmensa como desconocida.

La deforestación y la agricultura, que contribuyen a la disminución de la reserva orgánica del suelo, por una parte, y la quema de combustibles fósiles por otra, han modificado dicho equilibrio, calculándose un incremento del contenido del dióxido de carbono (CO_2) atmosférico que en los últimos 50 años se cifra en un 13 por ciento, sobre el 0,03 por ciento originario.

Pero si, a corto plazo, la disminución de la riqueza orgánica de los suelos no ofrece problemas desde el punto de vista de un aprovechamiento energético directo, tiene graves consecuencias sobre los rendimientos en la producción mundial de alimentos y fibras. Así, en primer lugar, la materia orgánica edáfica (del griego ἔδαφος, suelo) es fuente de energía para los microorganismos del suelo, a la vez que les suministra los nutrientes esenciales: nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), etcétera. Igualmente, regula la nutrición vegetal; proporciona una estructura favorable al suelo al actuar como cemento de unión entre las partículas, dando origen al complejo arcillo-húmico; favorece la retención de humedad por el suelo; incide sobre el balance hídrico y la erosión de los suelos; actúa de "amortiguador" al moderar los cambios de acidez e inactivar los elementos o compuestos orgánicos tóxicos, añadidos al suelo por contaminación; contiene incluso el factor energético que produce la diferenciación, dentro del suelo, de capas sucesivas que se denominan horizontes.

El origen de la materia orgánica del suelo es, lógicamente, los restos vegetales de toda naturaleza (hojas, ramas,



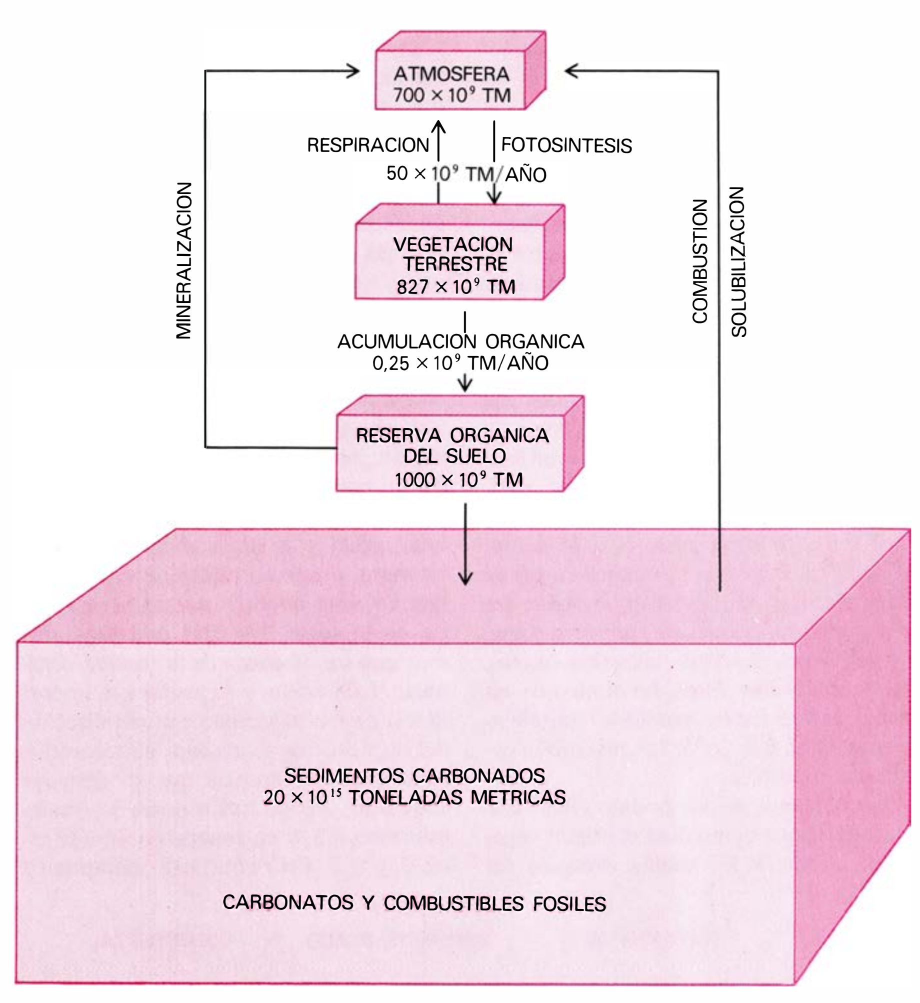


CORTE NATURAL de un suelo forestal (perfil). En él se observa que las raíces se concentran en el horizonte superior (rico en humus) del perfil; ello es motivado porque dicho horizonte húmico concentra una gran mayoría de elementos nutritivos asimilables para las plantas; las escasas raíces verticales hacia los horizontes inferiores minerales buscan, más que nutrientes, la humedad del suelo, fundamental para los meses de estiaje. Otro hecho singular destacable es la resistencia a la erosión del citado horizonte superior A, el cual sobresale como un alero pese a la excavación subyacente.

raíces y demás), excrementos y cadáveres de animales que viven en o sobre el suelo. Sin embargo, dichos residuos son atacados, transformados y descompuestos por la mesofauna del suelo (herbívoros, coprófagos, detritívoros, etcétera), así como por los microorganismos del suelo. Estos llevan la descomposición de la materia orgánica original a sus últimas consecuencias, biodegradando la lignina (ligninolisis), celulosas (celulolisis), almidón (amilolisis), proteínas (proteolisis y amonificación), etcétera. A consecuencia de ese mecanismo de desintegración, se liberan, como productos finales, y en condiciones normales de aireación, anhidrido carbónico (CO_2), agua (H_2O) y pequeñas cantidades de nitrógeno en forma amoniacal y nítrica, más otros residuos de naturaleza salina ("cenizas"): a este proceso se le denomina, por simplificación, "mineralización". Sin embargo, ya hemos dicho que una pequeña proporción se escapa al ciclo del carbono, es decir, no se mineraliza. Estas sustancias, que forzosamente deben ser estables frente a los microorganismos telúricos o edáficos, constituirán el objeto de nuestra atención.

La distribución de la materia orgánica dentro del suelo no es homogénea, sino que depende de las características climáticas, tipo de vegetación y utilización de los suelos. Así, si se observa "perfiles de suelos" –cortes transversales de los mismos–, comprobaremos que en las zonas frías y húmedas, con bosques de coníferas ("taiga") o mezclado de frondosas, la adición de materia orgánica es superficial, por lo que tiende a acumularse sobre el suelo o en los pocos centímetros superiores, a no ser que haya migraciones orgánicas. En climas templados húmedos, bajo árboles caducifolios, la influencia de la cubierta herbácea y sus raíces aminora ligeramente la acumulación superficial de la materia orgánica, por otra parte entremezclada por las lombrices de tierra y otros animalillos minadores. En climas continentales, la presencia casi exclusiva de gramíneas en las estepas origina un enriquecimiento de materia orgánica más homogéneo y profundo, a causa de la incorporación de las raíces a la masa del suelo. Por último, en los bosques tropicales se observa que la gran actividad biológica existente consume y mezcla la materia orgánica en todo el perfil, por lo que la homogeinización es casi total, aunque, paradójicamente, la acumulación orgánica sea escasa.

El contenido de materia orgánica de los suelos está, pues, mediatizado por dos procesos: acumulación o adición orgánica y mineralización o descomposición microbiana. Dado que la experiencia nos indica que el contenido orgánico de los suelos es prácticamente estable, ello implica la existencia de un equilibrio. Si denominamos A a la cantidad añadida anualmente (restos vegetales en casi su totalidad) y H a la reserva orgánica permanente en el suelo, el equilibrio dinámico en cuestión se expresa en la ecuación siguiente: $A - A \cdot k = H \cdot r$, donde k y r son los coeficientes de mineralización de los restos vegetales y las reservas orgánicas del suelo, respectivamente. Ello significa que la cantidad de reservas orgánicas mineralizadas anualmente debe ser compensada por los restos vegetales que quedan sin descomponer. Pero si la determinación de A y H es relativamente fácil, el cálculo de k y r resulta laborioso. Por significar intensidad de procesos oxidativos, estos coeficientes varían, principalmente, según la temperatura y la disponibilidad de oxígeno, pero también en razón de la humedad, vegetación, etcétera. Así, es posible establecer que r aumenta al acercarnos al Ecuador, y aunque la producción orgánica también aumenta, H forzosamente disminuye, lo cual se refleja en los perfiles de materia orgánica definidos antes. Por otra parte, k depende, además, del tipo de restos orgánicos añadidos al suelo: cuanto más celulósi-



EN EL CICLO DEL CARBONO se observa que las cantidades de carbono almacenado en el suelo, fijado como biomasa terrestre o inmovilizado en el suelo como reserva orgánica, son, aproximadamente, del mismo orden, aunque la suma de dichas cantidades representa poco más de la milésima parte del carbono englobado en los sedimentos geológicos. La concentración de CO_2 atmosférico ha aumentado en los últimos 50 años, por deforestación y quema de combustibles, en un 13 por ciento.

	Producción hojarasca A (Tm/Ha, año)		Valores de r (Porcentaje)		Valores de k (Porcentaje)
Bosque pluvial	80	Clima atlántico	1,5	Turba	10
Bosque caducifolio	20	Clima mediterráneo	2,0	Estiércol	60
Bosque coníferas	15	Huertas	3,0	Alfalfa	75
Bosque esclerófilo	8	Invernaderos	4,0	Paja	85

VALORES MEDIOS aproximados de *A*, *r* y *k*; tienen amplios márgenes de variación, ya que dependen de varios factores: suelo (textura, mineralogía, etc.), régimen de humedad, tipo de agricultura, etc.

cos y más ricos en nitrógeno sean, mejor se descompondrán; y al aumentar el valor de k, descenderá la acumulación orgánica.

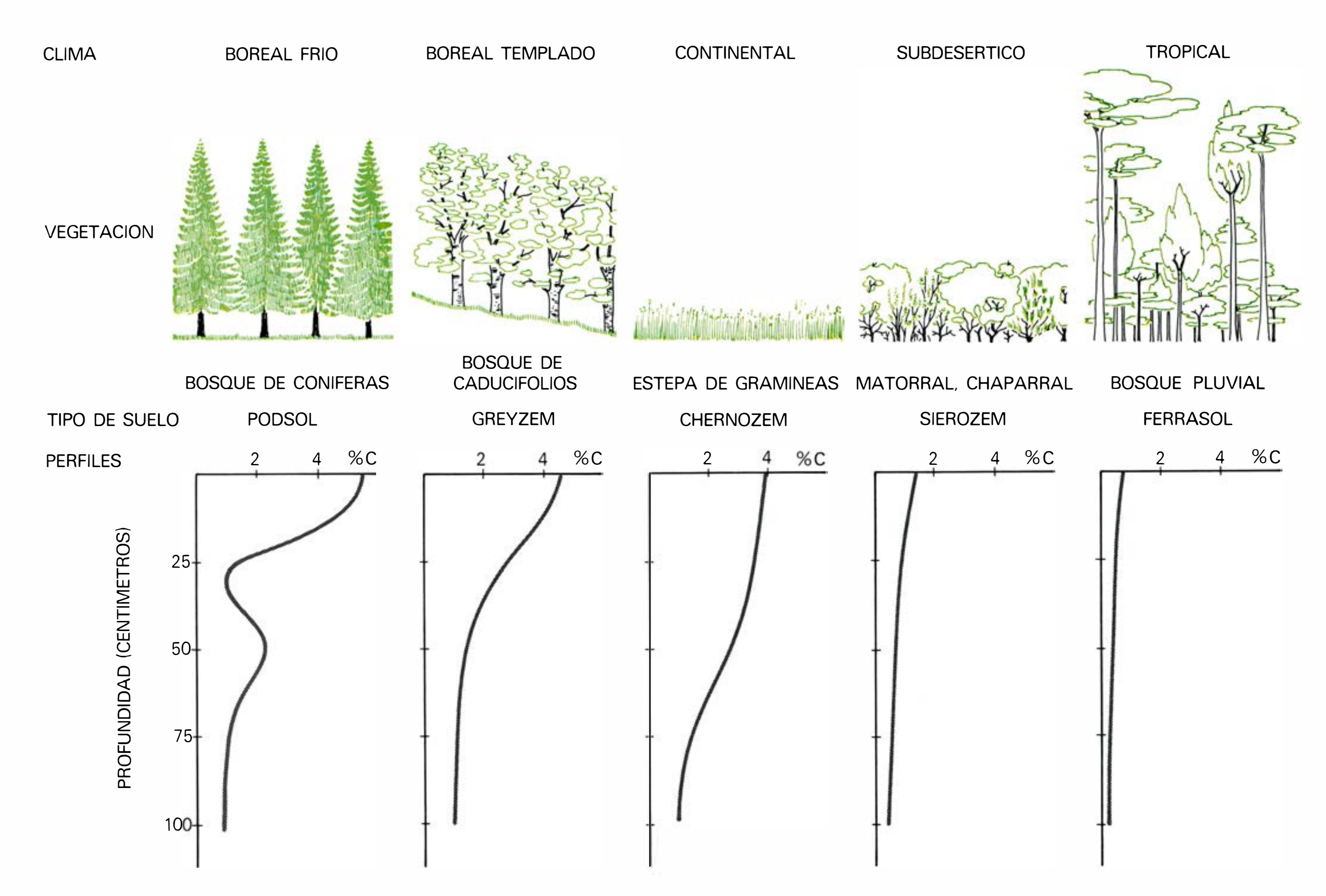
La complejidad de las sustancias orgánicas existentes en el suelo y la carencia actual de técnicas adecuadas para su caracterización no permiten profundizar hasta las últimas consecuencias. Hay que contar, además, con otro factor: todas y cada una de las múltiples sustancias orgánicas existentes en el suelo, al unirse con la parte mineral, forman lo que se denomina complejo organomineral. En la actualidad, se viene estudiando la fracción orgánica que se encuentra libre en el suelo o, a lo sumo, aquella fracción que se encuentra unida lábilmente, de tal manera que puede ser objeto de una extracción (por otra parte, no selectiva), mediante hidrólisis suaves. Intentar obtener altos rendimientos en estas extracciones conlleva, paralelamente, la alteración de las sustancias orgánicas naturales.

No obstante, se han podido identificar sustancias que denuncian el origen vegetal y animal de la materia orgánica del suelo: celulosas, azúcares, ligninas, polifenoles, pectinas, proteínas, aminoácidos, grasas, ácidos orgánicos, etcétera. Encontramos también sustancias constituyentes o excretadas por los microorganismos responsables de la degradación de los productos orgánicos anteriores, y lo más importante, aparecen además unas sustancias orgánicas difícilmente clasificables, de color oscuro, muy resistentes al ataque microbiano que, por ofrecer propiedades comunes, se engloban bajo la denominación genérica de sustancias húmicas del suelo, o, simplemente, humus. Estas suelen representar del 60 por ciento al 90 por ciento de la materia orgánica total del suelo, por lo que, unido a su bioestabilidad, no sólo interesan desde un punto de vista cuantitativo, sino también por su permanencia en el suelo. De ellas podemos afirmar que son la causa de la reserva orgánica, H, del suelo; y se justifica la importancia de r, coeficiente de mineralización del humus, que representa el porcentaje de la fracción húmica que se destruye cada año, siendo sus valores normales inferiores a 5, y en general oscilantes entre 2 y 0,1. Esto contrasta fuertemente con los valores de la constante de mineralización, k, de los restos vegetales, que suelen ser superiores al 25 por ciento, con lo que en tres años pueden desaparecer casi totalmente. Por otra parte, y si volvemos a la ecuación: $A - A \cdot k = H \cdot r$, podemos simplificar

$$A(1-k) = A \cdot i = H \cdot r, \text{ si } i = 1-k,$$

donde i representa la fracción de residuos vegetales que se convierte anualmente en humus; tiene valores bajos: normalmente inferiores al 25 por ciento. Se trata de la pequeña fracción que cada año se detrae del ciclo del carbono para acumularse en el suelo. Se puede establecer, por tanto, que al proceso de mineralización total de los restos vegetales se opone un proceso denominado de "humificación", esto es, formación de sustancias húmicas.

Aunque en un principio se pretendía aislar y purificar una a una las posibles sustancias húmicas, hoy tal método de investigación se ha abandonado. Se sabe que, no obstante mostrar propiedades afines, esas sustancias son heterogé-



ZONALIDAD Y PARALELISMO existente entre clima, vegetación y suelo. Podríamos añadir también la distribución del carbono orgánico del suelo. En los países tropicales y subtropicales, el contenido de carbono es escaso, aunque con perfil de distribución homogéneo a causa de la alta actividad biológica; en las estepas rusas y praderas y pampas americanas, se mantiene la homogeneidad, formando isohumismo, aunque los suelos están fuertemente enriquecidos en materia orgánica. Al pasar al bosque caducifolio templado se observa una brusca disminución al profundizar unos pocos centímetros en el suelo, pero se mantiene la riqueza superficial en carbono. En los bosques de coníferas rusos y canadienses (la taiga), se aprecia un segundo máximo orgánico en profundidad, a causa de las migraciones de materia orgánica en esas condiciones ecológicas (podsolización).

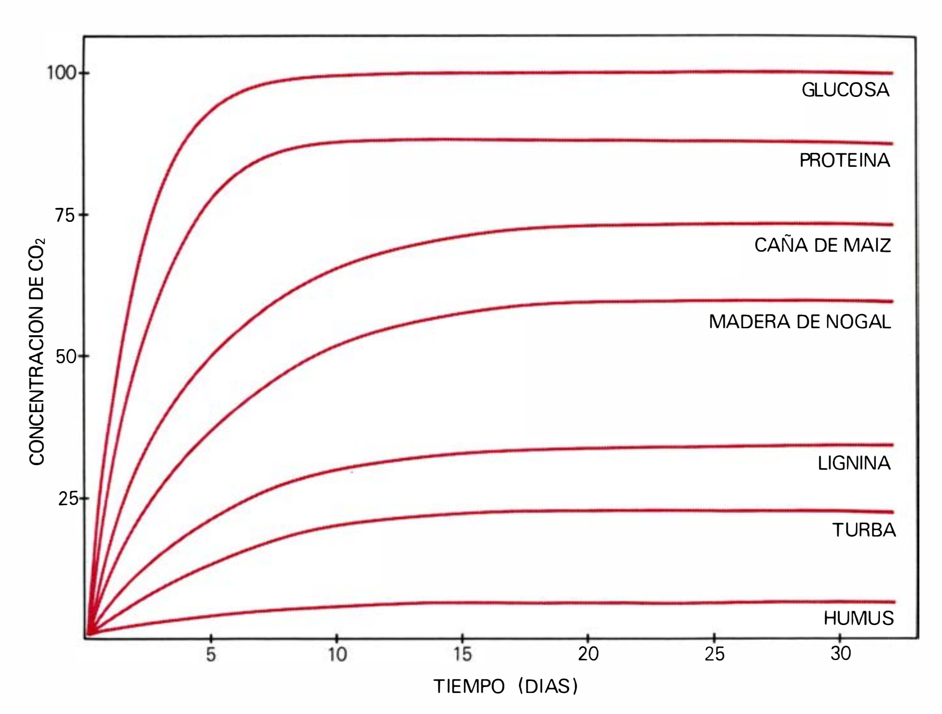
neas tanto por su origen como por su composición. Integran el humus un conglomerado de sustancias orgánicas que, junto a las resistentes al ataque microbiano (polifenoles, quinonas, pigmentos, antibióticos y otras), hay que unir las excretadas por los propios microorganismos y, a su vez, otras que, aunque biodegradables, han sido absorbidas por aquéllas. Todo este complejo se encuentra adsorbido sobre los coloides inorgánicos, protegiéndole aún más de la degradación microbiana. Este proceso de humificación, dirigido mayormente por la actividad microbiana, conduce al ennegrecimiento y a la bioestabilidad comunes a todas las sustancias húmicas.

Cada medio edáfico y climático da origen a unas características del humus diferentes. No existe *un* humus, sino tantos cuantas condiciones ecológicas, al menos en teoría, si bien manteniendo las características comunes aludidas; por ello se dice que el humus es un índice adecuado para la caracterización de los suelos y su génesis. Tampoco debemos asimilar el concepto de humus al uso popular del término que lo identifica con el mantillo u hojarasca de los bosques. Antes bien, designa las sustancias orgánicas oscuras, amorfas, coloidales y más o menos permanentes que se encuentran en los suelos.

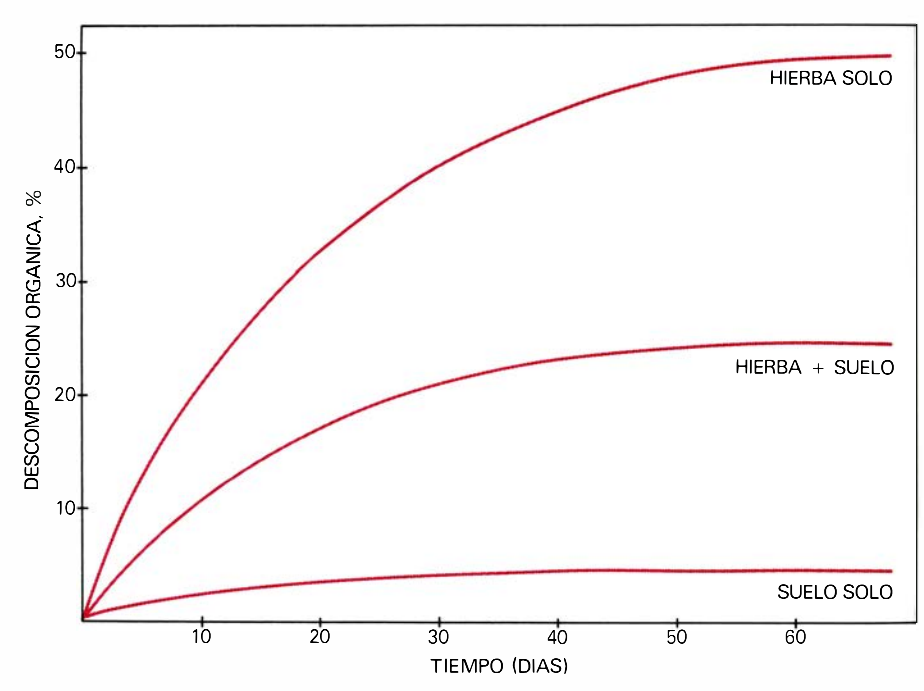
Aunque no es posible asignar una fórmula a las moléculas húmicas, al menos pueden establecerse unos límites entre los cuales oscila su composición elemental. Así, el contenido de carbono se encuentra entre el 40 y el 65 por ciento, el oxígeno entre el 30 y el 50 por ciento; el nitrógeno y el hidrógeno entre el 1 y el 6 por ciento, mientras que otros componentes como fósforo, azufre y cationes inorgánicos no suelen superar el dos por ciento. El peso molecular, calculado mediante diversos métodos, da resultados muy variables, encontrándose en la bibliografía especializada desde valores tan bajos como 5000 hasta valores que superan el medio millón. La solubilidad, que en cierta manera está relacionada con el peso molecular, y también el número de grupos ácidos, varía ampliamente. Se ha postulado que en el seno de la macromolécula húmica existe una parte hidrófila, asociada a grupos ionizables, así como otra hidrófoba, de carácter aromático. Dependiendo del predominio de cada una de dichas partes, a veces incluso parcialmente separable por hidrólisis, se originan las diferentes solubilidades.

Se suelen separar diferentes fracciones atendiendo a esta solubilidad. De esta manera se obtienen los ácidos fúlvicos (de color amarillento) sometiendo el suelo a extracción con hidróxido sódico diluido, y posteriormente acidulando hasta *p*H próximo a 1. El líquido amarillo rojizo contiene los ácidos fúlvicos y el precipitado castaño oscuro o negro, insoluble en dicho medio ácido, constituye la fracción húmica. Todo lo que queda sin extraer se denomina, convencionalmente, humina.

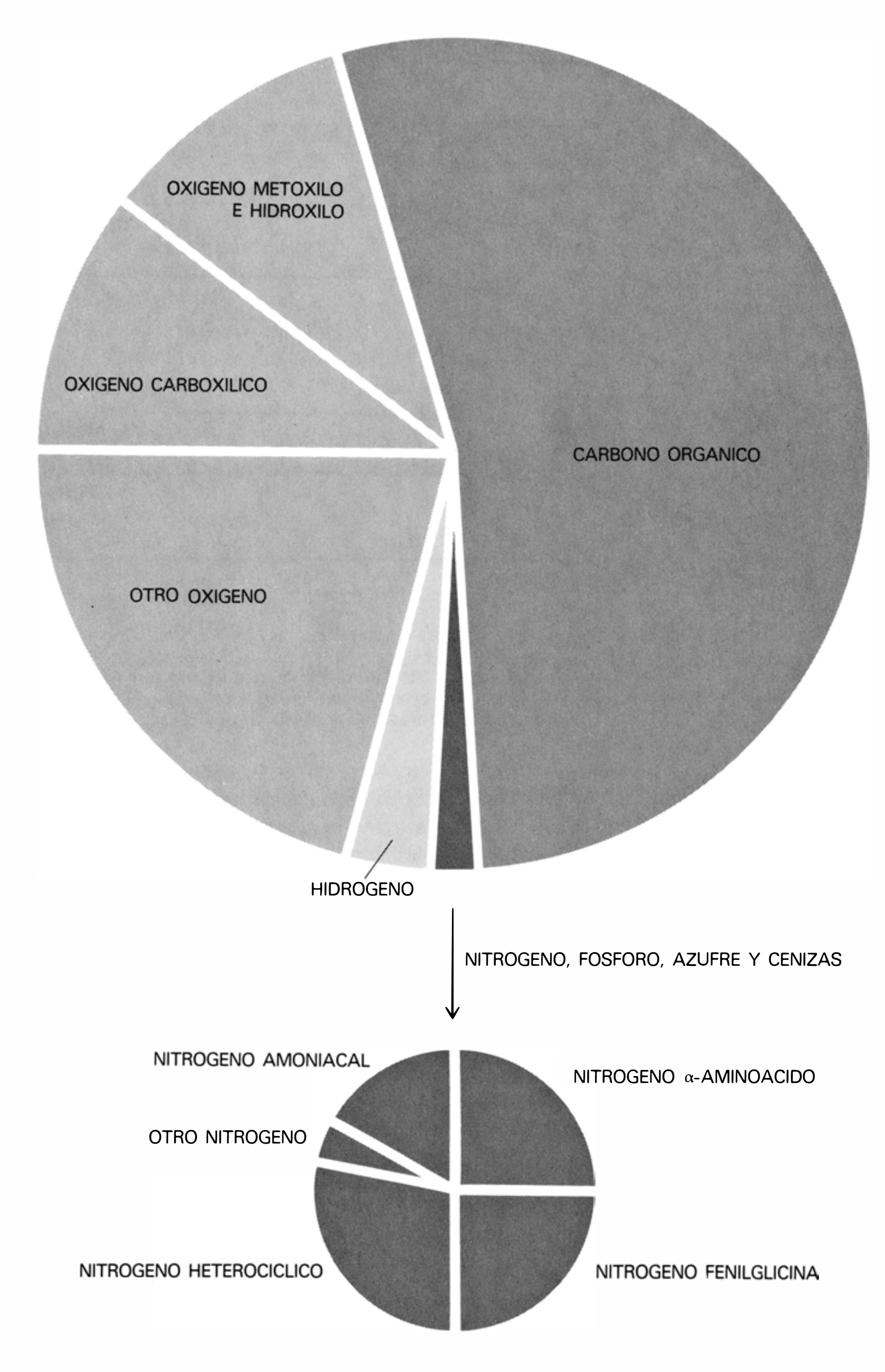
Los ácidos fúlvicos son mucho más ricos en oxígeno y en grupos ácidos que los ácidos húmicos, aunque unos y otros deben encontrarse asociados en el suelo mediante uniones fácilmente hidrolizables. Junto a los primeros se separan polisacáridos, ácidos urónicos y aminados, fenoles y derivados del inositol y taninos, entre otros. Por su parte, los ácidos húmicos son de alto peso molecular y en su composición se observa menos oxígeno, pero más carbono y nitrógeno heterocíclico: de ahí que su insolubilidad en el suelo se halle asegurada. Las sustancias no extraíbles o huminas han



MINERALIZACION RELATIVA DE COMPUESTOS ORGANICOS, medida mediante desprendimiento de dióxido de carbono, por los microorganismos telúricos. Se observa la bioestabilidad del humus, así como la resistencia a la degradación mostrada tanto por la lignina como por la turba.



EL MEDIO EDAFICO cobra singular importancia en la mineralización de los restos vegetales. Así, en la descomposición de hierba, la adsorción de los metabolitos orgánicos sobre coloides inorgánicos origina un retardo evidente respecto a la situación en que la hierba no se mezcla con suelo alguno.



COMPOSICION MEDIA DE LAS SUSTANCIAS HUMICAS. Se observa que son sustancias muy carbonadas y oxidadas, destacando la presencia de grupos ácidos carboxílicos y fenólicos. La pequeña proporción de N, P y S que contiene la molécula húmica posee un gran interés agronómico; casi el 50 por ciento del nitrógeno húmico se encuentra como nitrógeno en forma amoniacal o proteínico, pero existe más del 50 por ciento que no es hidrolizable ni siquiera con ácido clorhídrico 6 Normal.

sido, por su naturaleza, menos estudiadas. Sin embargo, todas las investigaciones indican, al parecer, que se trata de sustancias similares a las anteriores, aunque debido a su fuerte interacción con los materiales arcillosos, los extractantes usuales se muestran ineficaces.

Una fracción que, hablando con estricta propiedad, no podemos considerarla humus, si bien cada día cobra mayor interés, es aquella soluble en agua, compuesta principalmente por ácidos orgánicos, carboxílicos y fenólicos, azúcares y aminoácidos y que, por consiguiente, tiene una gran movilidad en el suelo, aunque lógicamente es fácilmente biodegradable en suelos cuya actividad microbiana no se encuentre reducida por algún factor ecológico (baja temperatura, acidez, etcétera).

Se ha pretendido asignar una estructura a estas sustancias húmicas que explique cada una de sus propiedades. Así, se supone que existe un núcleo policíclico central aromático, unido lábilmente a restos alifáticos y polifenólicos laterales, fácilmente liberables. Aunque el origen de los núcleos puede ser vario, como radicales polifenólicos lígnicos o microbianos, en su polimerización pueden atrapar y englobar diversas sustancias –péptidos, ácidos urónicos y otros–, de forma caótica, con lo que no se puede decir que dos moléculas húmicas sean idénticas. Entre unas micelas orgánicas y otras se establecen uniones por puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals, al igual que entre micelas y partículas de arcillas, aunque se ha postulado que en este caso se realizan mayormente a través de los cationes de cambio, o bien, mediante sesquióxidos hidratados de hierro y aluminio.

La difícil caracterización del material húmico y la falta de un límite neto entre lo natural y lo neoformado en el laboratorio ha empujado a los científicos a buscar en la morfología original de los horizontes superiores del suelo, los llamados horizontes húmicos *A*, la posible diferenciación de clases de humus. Aquí, pues, el concepto de humus se amplía al conjunto de material orgánico que reposa sobre o en el suelo. Clásicamente se vienen distinguiendo, si exceptuamos los tipos hidromorfos de turba y anmoor, las siguientes formas de humus:

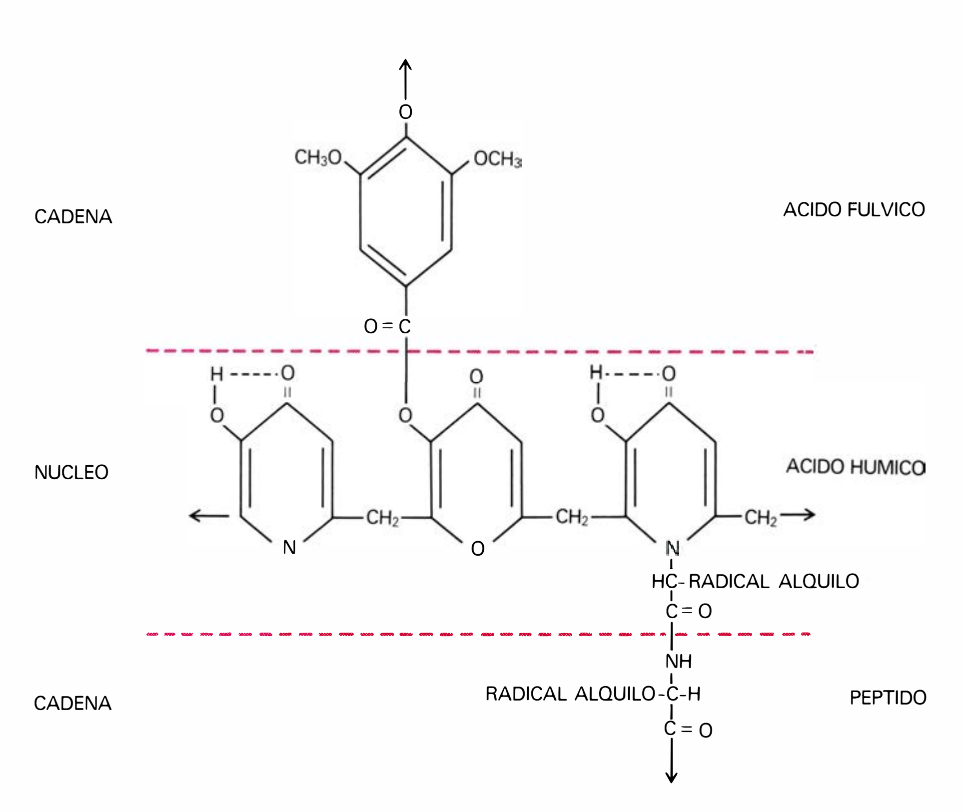
1) *Mor*. Se distingue por una acumulación orgánica superficial, generalmente con estructura laminar de restos vegetales poco desmenuzados y descompuestos, en medios ácidos a muy ácidos; característico de lugares fríos y húmedos, con vegetación de coníferas (taiga) y ericáceas (brezal); en la zona de contacto con el material mineral, suelen encontrarse hifas de hongos, estando el material orgánico más descompuesto; con pobreza en nitrógeno (razón C/N superior a 25); el material mineral en los horizontes orgánicos superiores es escaso, hallándose en todo caso granos de arena aislados y limpios (decolorados); abundan las sustancias orgánicas hidrosolubles citadas, con posibilidad de formación de sales complejas solubles con los cationes, por lo que existe una movilización hacia la profundidad en el perfil: ello empobrece los horizontes superiores (horizontes *A* y *E*, eluviales) y enriquece parcialmente los inferiores (horizontes *B*, iluviales); a este fenómeno se le designa con el nombre de podsolización.

2) *Mull*. Se define por contener material orgánico completamente humificado, homogeinizado y mezclado íntimamente con el material inorgánico del suelo; buena estructura –grumosa– y ai-

reación; acumulación de hojarasca sólo estacional; abundancia de lombrices de tierra, en suelos neutros o moderadamente ácidos; pobres en sustancias hidrosolubles, pero bien provistos de nitrógeno, siendo la razón C/N normalmente inferior a 15; la vegetación es de gramíneas o cubierta forestal con predominio de fagáceas –robles, y castaños–. Existe alta proporción de sustancias no extraíbles (humina) y los ácidos fúlvicos pueden originarse por hidrólisis de los húmicos. Se trata de una formación típica de los suelos de praderas y estepas (chernozems).

3) *Moder.* Constituye una forma intermedia entre el mor y el mull; el material orgánico, aunque desmenuzado y descompuesto, se encuentra yuxtapuesto y moderadamente mezclado con el material inorgánico; la aireación suele ser buena, aunque temporalmente llegue a resultar insuficiente; abundan los excrementos de pequeños animales (ácaros, colémbolos y otros), siendo la vegetación y demás características ecológicas muy diversas; esta formación existe cuando aparece un factor que limita la formación de mull: por ejemplo, pobreza en arcillas, medios ácidos, etcétera. La razón C/N oscila entre 15 y 25, siendo abundantes los ácidos fúlvicos, aunque su movilización, junto con la de los cationes que engloban, suele estar restringida; superficialmente y bajo bosque, aparece hojarasca, con olor característico.

Una vez conocida la naturaleza del humus, podemos abordar cada uno de los efectos que éste tiene sobre la evolución del suelo y la nutrición vegetal. Aunque enumeraremos cada una de las consecuencias por separado, conviene advertir que todas las acciones del humus se dan simultáneamente en el suelo, lo que explica las frecuentes interacciones y los efectos secundarios.



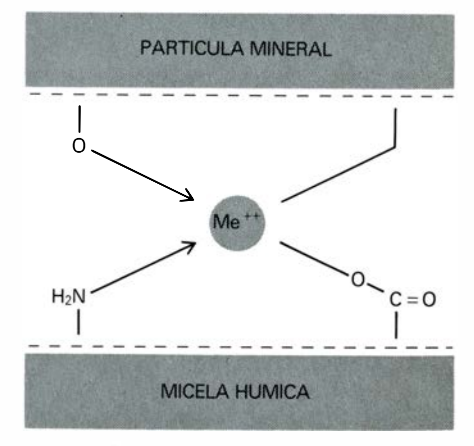
ESTRUCTURA DE LAS SUSTANCIAS HUMICAS, según Felbeck. Se observa un núcleo central de carácter aromático (pirónico), con nitrógeno y oxígeno heterocíclico, a la vez que existen cadenas laterales fácilmente hidrolizables que darían origen a los ácidos fúlvicos y a nitrógeno proteínico.

Materia orgánica y microorganismos son dos componentes del suelo, íntimamente ligados, hasta el punto de que suelen considerarse como un único sistema. La presencia de materia orgánica permite la vida microbiana, al aportar energía y nutrientes. A su vez, la acción microbiológica elabora y condiciona la formación húmica, tanto en calidad como en cantidad. De este modo, gran cantidad de materia orgánica es mineralizada por los microorganismos telúricos a fin de obtener energía para sus funciones vitales. (Las bacterias fijadoras de nitrógeno no-simbióticas solicitan una gran demanda energética). La población microbiana oscila fuertemente de acuerdo con las condiciones ambientales del momento, principalmente la temperatura –en primavera y otoño–, y la humedad –verano–, pasando a formas de vida latentes –enquistamiento o esporulación–, cuando las condiciones de vida se vuelven adversas –invierno–. A veces, un aumento repentino de la temperatura o humedad produce auténticas explosiones de vida microbiana que se pone de manifiesto por el aumento de CO_2 del suelo y, en razón del fenómeno, las plantas pueden sufrir carencias en el suministro de nitrógeno, al existir una competitividad por parte de los microorganismos.

Además, mientras que en la estación de otoño la presencia de hojarasca fácilmente biodegradable promueve la presencia de bacterias y protozoos, en verano son necesarias sucesiones microbianas especializadas de microorganismos para metabolizar los restos carbonados poco biodegradables existentes en el suelo. Todo ello conlleva una gran dificultad en el estudio de los microorganismos del suelo, aunque se ha podido establecer que, aparte del factor climático, la microflora telúrica se ve limitada también por el contenido en nitrógeno de los restos vegetales.

Las sustancias orgánicas hidrosolubles provenientes de la hojarasca, las fracciones fúlvicas más solubles y el CO_2 producido en la respiración de microorganismos y raíces favorecen la hidrólisis y solubilización de los minerales del suelo (carbonatos y fosfatos, entre otros) esto es, aceleran su alteración, liberándose elementos inorgánicos solubles que, o bien pasan a la solución del suelo, y con ello se encuentran en condiciones de ser asimilados por las plantas, o bien son adsorbidos o absorbidos por el complejo organomineral, por lo que, al ser retenidos más o menos temporalmente, constituyen una reserva de nutrientes para los vegetales.

Si el ataque es moderado, en suelos de mull por ejemplo, se forma un frente de alteración más o menos superficial denominado horizonte *A*; éste avanza en función de la permeabilidad del suelo, la climatología y vegetación. Se trata de



MODELO TEORICO de unión organomineral. Se supone que el catión es responsable de establecer la unión entre los dos coloides electronegativos; la facilidad de extracción orgánica dependerá, pues, de la fuerza de unión arcillo-húmica.

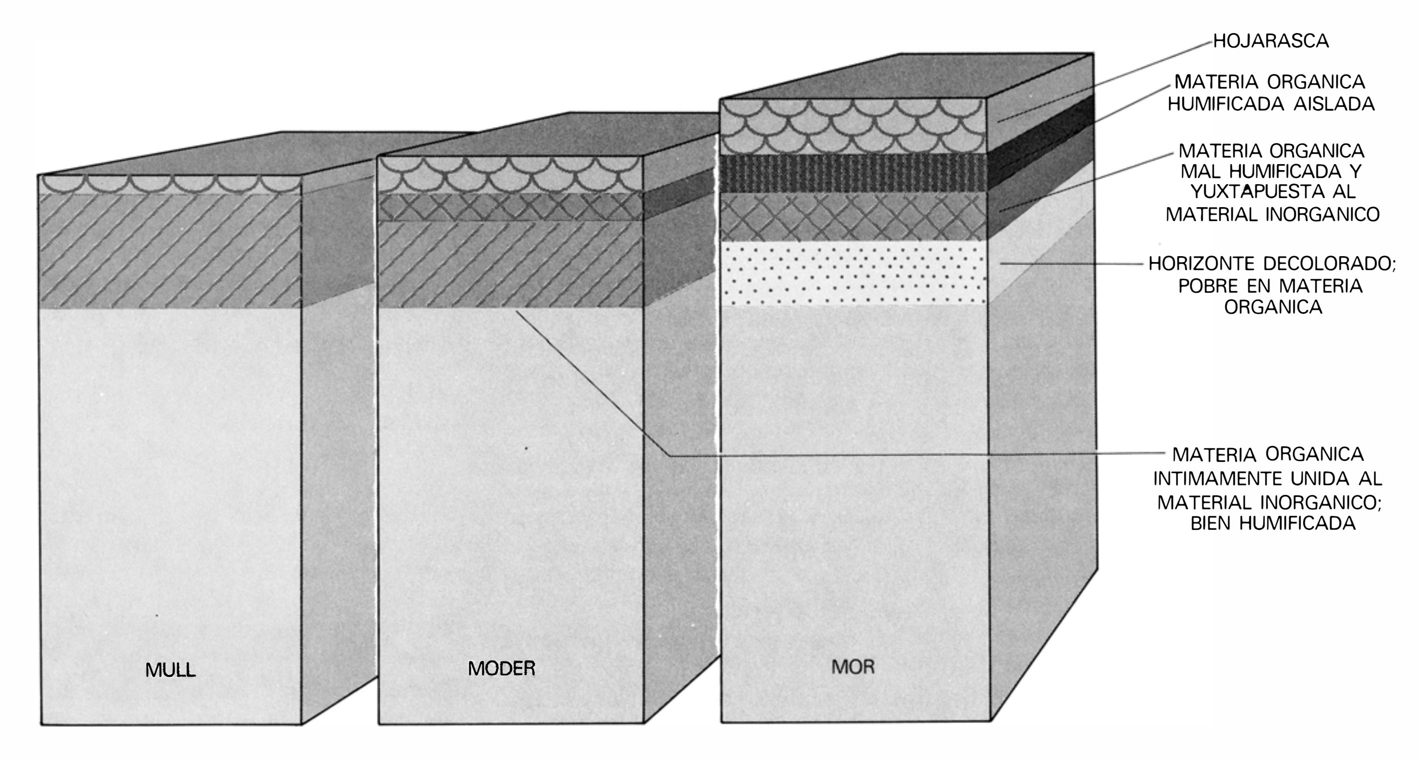
una zona particularmente rica en elementos nutritivos que favorece el desarrollo vegetal. Este fenómeno se conoce con el nombre de empardecimiento del suelo. Por el contrario, si el ataque es intenso, en suelos con mor por ejemplo, a causa de la abundancia de ácidos polihidroxicarboxilados o fenólicos, se forman sales complejas muy estables (quelatos), generalmente solubles, que hacen emigrar los cationes hacia la profundidad del perfil: bajo la capa superficial de hojarasca y materia humificada, aparece un residuo cuarzoso poco alterable. Se produce así la podsolización del suelo, que comporta un empobrecimiento de nutrientes del horizonte superior, al perderse hacia las aguas subterráneas o precipitar y acumularse en un horizonte inferior (horizonte *B*), bien por un aumento de *p*H, coloides y cationes o por la biodegradación de las sustancias orgánicas acompañantes. Observamos, pues, que la materia orgánica es elemento vector en la diferenciación de perfiles en horizontes, dando origen a los diferentes tipos de suelos.

Sólo una pequeña parte de la materia orgánica se encuentra libre, ya sea en forma ácida o en forma de sales, en los suelos de mull. El mayoritario resto se constituye en el complejo arcillohúmico. Las uniones son de diferente naturaleza: físicas, por adsorción sobre geles de óxidos hidratados de hierro, aluminio y sílice; fisicoquímicas, por unión con arcillas y carbonatos; e, incluso, químicas. Dado que tanto el humus como las arcillas son micelas cargadas negativamente por la disociación de sus grupos acidoides, necesitan para su unión la presencia de cationes que sirvan de puente de unión, según se ha apuntado más arriba. Se observa, pues, que pueden existir gradaciones de intensidad de unión entre partículas orgánicas e inorgánicas muy dilatadas, lo que origina la diversidad de estructuras que se observan en los suelos y respuestas frente a los agentes extractantes de humus y arcillas.

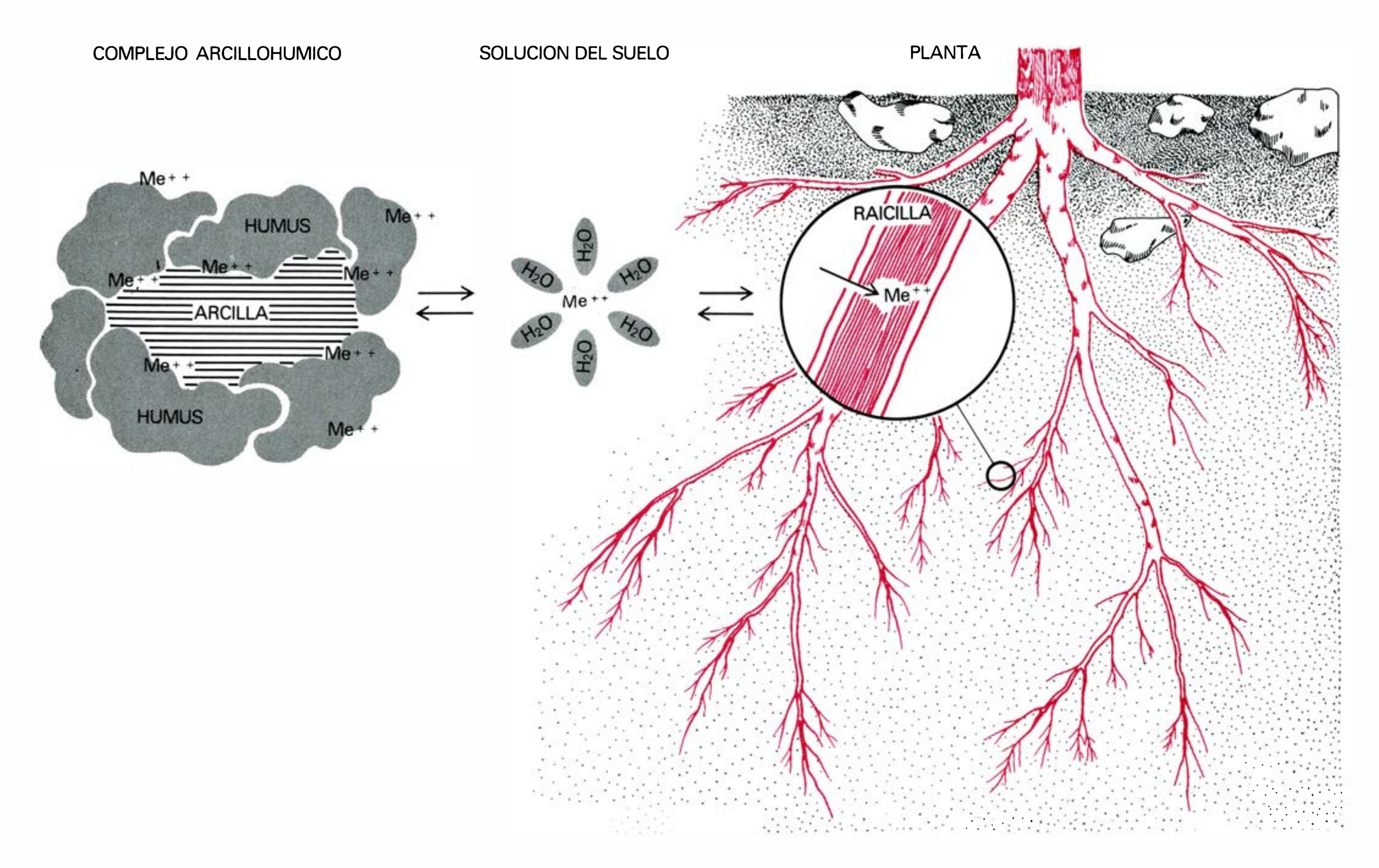
La estructura del suelo se origina por fenómenos complejos donde intervienen causas internas como pueden ser la composición mineralógica y granulométrica del suelo, la abundancia y naturaleza de la materia orgánica y la clase de interacción organomineral, y causas externas de orden climático, florístico o derivadas del propio uso del suelo. Cobra singular importancia la materia orgánica y su unión a la parte mineral en suelos arenosos y arcillosos, donde las estructuras fácilmente degeneran de un modo desfavorable; pero los efectos negativos se ven paliados por la presencia de materia orgánica. Así, en los últimos suelos aumentan los rendimientos por incorporación de materia orgánica, bien como estiércol, ya en forma de abonos en verde y hojarasca, aunque sea sólo rentable actualmente en cultivos de huertas o primor. Debe destacarse el mejoramiento estructural de los suelos tras praderas temporales. Después de la roturación y el arado, la drástica oxidación-mineralización de las sustancias orgánicas (incluidas algunas propiamente húmicas, y otras lábiles pero no por ello menos importantes en la agregación del suelo) no compensada adecuadamente por nuevas aportaciones de restos vegetales, se asiste a la continua desaparición de la estructura grumosa inicial para pasar a estructuras laminares o masivas, impermeables al agua y desfavorables para el desarrollo radicular. En la formación de las estructuras edáficas, adquiere un interés singular la presencia de lombrices y bacterias, que exige medios neutros o poco ácidos y provistos de materia orgánica, merced a los elementos coprógenos y a las excreciones mucilaginosas, respectivamente.

El *p*H del suelo está condicionado (en ausencia de ácidos inorgánicos, típico de suelos con sulfuros) por la acidez y abundancia de los grupos ácidos orgánicos. Ahora bien, la concurrencia de un sinnúmero de éstos con amplia gama de grado de disociación origina lo que se denomina poder de amortiguación del suelo, que consiste en que pequeñas adiciones de ácidos o bases añadidas al suelo no tienen efectos sobre el *p*H medio del suelo.

La capacidad que ostentan las sustancias húmicas de formar sales, más o menos disociadas, junto con la adsorción de cationes por las arcillas, origina el complejo de cambio iónico, mediante



LAS TRES FORMAS DE HUMUS PRINCIPALES. El mor se distingue por una acumulación orgánica superficial, restos vegetales poco desmenuzados en medios ácidos; el mull contiene material orgánico completamente humificado, homogeinizado y mezclado con el material inorgánico; en el moder, el material orgánico se halla yuxtapuesto al inorgánico. (Esta ilustración, de M. Alonso, se basa en los esquemas de Ph. Duchaufour.)



EQUILIBRIO suelo-solución-raíz de la planta. Cuando una base (Me^{++}) es absorbida por la planta, el equilibrio se desplaza hacia la derecha y otro catión (Me^{++}) pasa desde el coloide organomineral a la solución del suelo. Estos equilibrios se rigen fundamentalmente por la ley de Guldberg Waage.

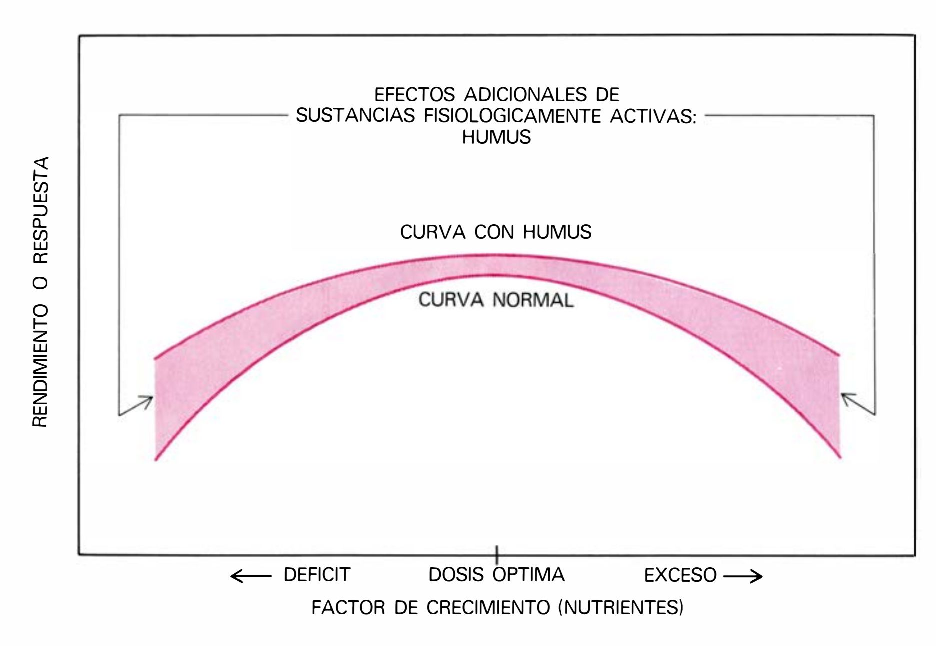
el cual existe un equilibrio dinámico de cationes, llamados bases de cambio (y, en menor grado, de aniones), entre el complejo organomineral y la solución del suelo, permitiendo así la adecuada nutrición vegetal. Aunque tienen características peculiares, estos equilibrios se rigen fundamentalmente por la Ley de Guldberg-Waage. La presencia de materia orgánica favorece, pues, la creación de una reserva de bases, que luego se irán cediendo a la disolución edáfica y a la planta, a medida que ésta lo solicita. Es necesario que en todo caso exista una reposición anual de cationes básicos, bien mediante el ciclo natural, bien por la adición de fertilizantes industriales.

Si bien la materia orgánica altera los minerales de los horizontes superiores del suelo en ciertas condiciones, tiende también a transportar las bases nutritivas liberadas hacia la profundidad del perfil, proceso que detiene una fuerte actividad biológica (humus mull) o contrarresta la adición superficial de nutrientes, bien por el propio ciclo natural, a través de la hojarasca, bien por la adición de fertilizantes artificiales. Sin embargo, cuando estos aportes no son suficientes, existe una disminución de la concentración iónica del suelo y una protección hidrófila orgánica de los coloides inorgánicos, con lo que es posible la movilización de éstos hacia los horizontes inferiores *B*, enriqueciéndose éstos en partículas arcillosas, mecanismo llamado de lixiviación.

Los horizontes capaces de suministrar convenientemente nutrientes a la planta vendrán en función de la forma de humus y del tipo de suelo, además del elemento químico en cuestión. Así, es evidente que los elementos químicos muy solubles (Na^+, K^+) se eliminan fácilmente del suelo, a menos que sean retenidos fuertemente por las arcillas (caso del K^+). Otros menos solubles (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}) son retenidos por el complejo organomineral en forma cambiable. Sin embargo, según predomine el simple empardecimiento o la lixiviación, la disponibilidad máxima de estas bases se encontrarán en superficie o en profundidad, respectivamente. Otros elementos más insolubles (P, Al, Fe), se encontrarán en la disolución del suelo en concentraciones mínimas, pero siempre constantes, de acuerdo con su producto de solubilidad.

El nitrógeno, el fósforo y el azufre tienen un comportamiento especial, debido a que forman parte importante de las moléculas orgánicas. Por ello su porcentaje total es paralelo al contenido orgánico de cada horizonte. (La relación entre carbono orgánico y nitrógeno de los suelos cultivados suele ser constante y próxima a 10). Sin embargo, bajo forma orgánica no son directamente asimilables por las plantas, por lo que es necesario su catabolización o mineralización microbiana, para pasar a forma amoniacal (NH_4^+) o nítrica (NO_3^-) y en el caso del P y S, como PO_4^{3-} y SO_4^{2-}, respectivamente. Esto sucede con un ritmo adecuado en los suelos de mull, e incluso a veces con humus moder; pero en los suelos con humus mor el nitrógeno orgánico se acumula en los horizontes orgánicos superficiales y las plantas sufren frecuentes carencias. Una vez mineralizado el nitrógeno, si no lo toma el sistema radicular de las plantas, se lava fácilmente del suelo, en forma de NO_3^- o es fijado más o menos fuertemente por las arcillas, en forma de NH_4^+. Con todo, en los suelos de mull puede existir competencia por N y P entre los microorganismos y las plantas, por lo que es adecuado añadir cantidades supletorias de dichos elementos cuando éstas necesitan de ellos de manera crítica en la sementera y primavera.

No terminan aquí los efectos beneficiosos de la materia orgánica del suelo. Su presencia mejora no sólo la asimilabilidad de los nutrientes poco solubles



LAS FRACCIONES ORGANICAS FISIOLOGICAMENTE ACTIVAS aumentan la respuesta a un factor de crecimiento (nutrientes, luminosidad, oxigenación, humedad, etcétera), con lo que los rendimientos mejoran, aunque alguno de aquellos se encuentre en defecto o exceso; la presencia de humus conlleva, pues, una disminución de riesgos frente a condiciones adversas. (Ilustración del autor.)

aludidos, como el fósforo y el manganeso, sino que también suministra adecuadamente de oligoelementos, es decir, nutrientes que la planta necesita en muy pequeñas cantidades (Zn, Cu, Mo y otros). Además, disminuye los fenómenos de antagonismo entre los elementos nutritivos abundantes, como el calcio, y aquellos que suelen ser a veces minoritarios, como el magnesio, hierro, etcétera. Por ello, en los suelos calizos, algunos oligoelementos se suministran a través del abonado orgánico o, incluso, mediante fumigaciones con compuestos orgánicos de los mismos.

Por otra parte, el efecto de amortiguación de los suelos por causa de la materia orgánica humificada no sólo se refiere a la adición de ácidos o bases, sino también a otras contaminaciones, fungicidas y herbicidas incluidos, pues al ser absorbidos sobre las micelas coloidales del suelo, se neutralizan sus principios activos; así, un suelo bien provisto de materia orgánica se encuentra con mayores defensas frente a invasiones bacterianas y fúngicas tóxicas para las plantas. Son múltiples los efectos indirectos de la materia orgánica sobre las propiedades del suelo, tales como la aireación, permeabilidad, erosionabilidad y desarrollo radicícola, conectadas todas ellas con la estructura del suelo. Mención aparte merece la erosionabilidad de los suelos del área mediterránea desprovistos de materia orgánica.

Existe, pues, una relación entre materia orgánica y productividad del suelo. Aunque muchos experimentos se han realizado en condiciones restringidas y predeterminadas, parecen apoyar la idea de que la presencia de la materia orgánica incrementa los rendimientos en aquellas condiciones donde existe uno o varios factores limitantes, entre los que se cuentan carencias o sobredosis de nutrientes, sequedad, mala aireación y otros. Sin embargo, cuando todas las condiciones son óptimas, los redimientos causados por adiciones orgánicas resultan de escaso valor o rentabilidad.

Hemos ido repasando las acciones de la materia orgánica sobre la evolución del suelo y la nutrición vegetal, destacando la importancia extrema de aquélla sobre la producción de alimentos y fibras para el hombre. A ese papel se han remitido organismos internacionales como la FAO y la IAEA. Pero nos hallamos muy lejos todavía de comprender el misterio que encierra la molécula húmica y su formación. Por ello las investigaciones en este terreno son dobles: sobre el conocimiento intrínseco del humus y sobre causas y efectos que ejercen sobre el suelo y las plantas que se desarrollan en su superficie, así como la búsqueda de fuentes económicas para la obtención de materia orgánica o sustitutivos de ella. Hacia esos campos de investigación no sólo se dirigen los estudios del grupo de humus del CSIC español, sino también los trabajos de múltiples centros de investigación extranjeros, principalmente alemanes, australianos, canadienses, franceses, ingleses, neozelandeses, norteamericanos y rusos, ya con carácter básico o aplicado.

El computador superconductor

Una nueva tecnología microelectrónica sustituirá a los viejos transistores por interruptores superconductores. Los computadores que se fabriquen con ellos podrán efectuar hasta mil millones de operaciones elementales por segundo

Juri Matisoo

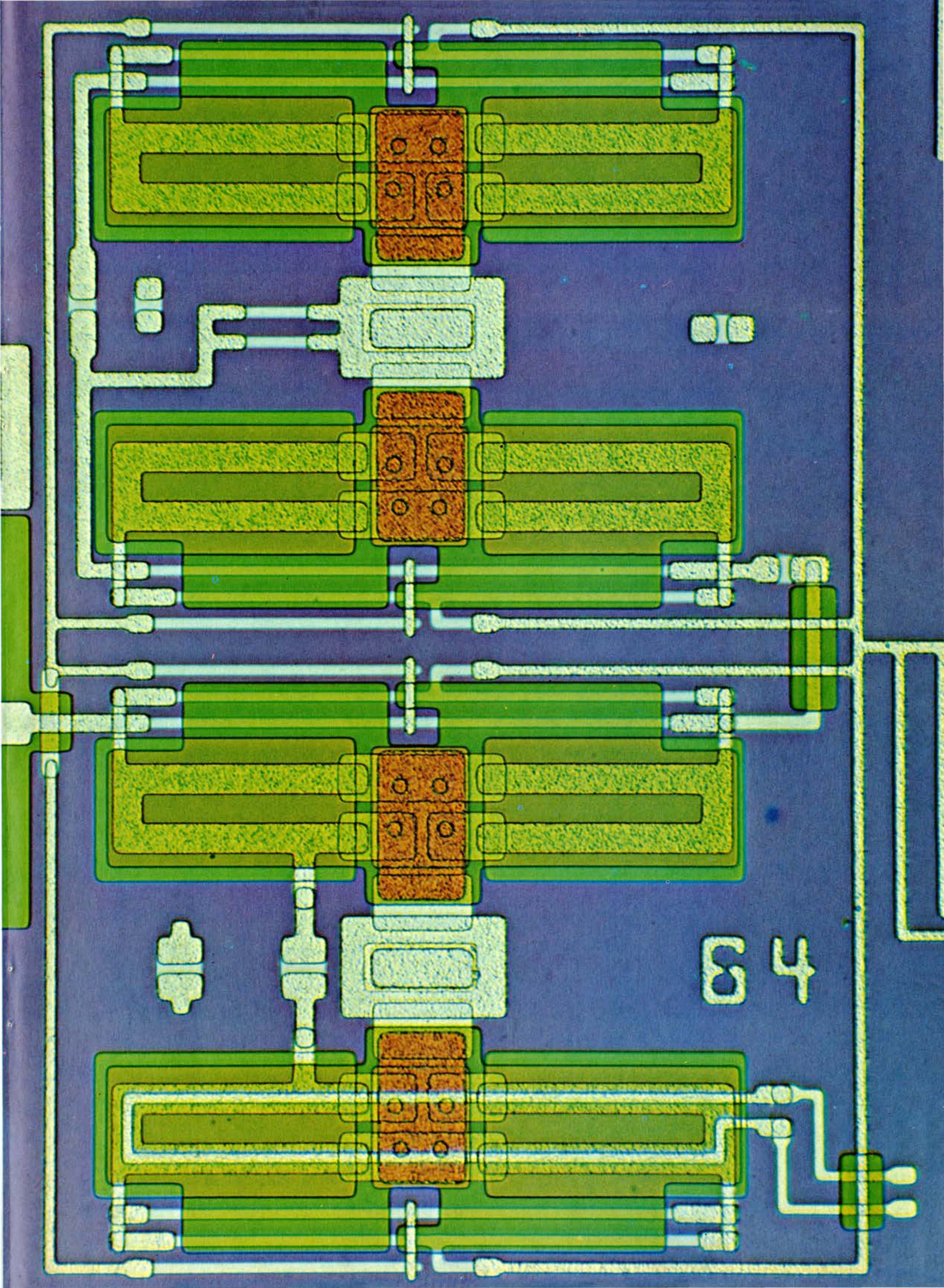
La nueva meta en el desarrollo del computador digital de alta velocidad estriba en conseguir un tiempo de ciclo de un nanosegundo, o milmillonésima de segundo. Se denomina tiempo de ciclo al intervalo que media entre pulsaciones del reloj maestro del computador; la mayoría de los actuales computadores de alto rendimiento poseen tiempos de ciclo entre 30 y 50 nanosegundos. ¿Cómo será un computador de un nanosegundo? Un imperativo obvio es que los elementos del circuito básico del computador, que pueden considerarse como interruptores, deben ser capaces de cambiar de estado en menos de un nanosegundo. Y lo que es igualmente importante, las señales deberán ser comunicadas desde un elemento del circuito a otro en un tiempo mucho menor que el tiempo del ciclo. Este último requerimiento impone un límite más fundamental en la velocidad de cálculo y trae consigo una implicación sorprendente: cualquier computador ultrarrápido habrá de ser muy pequeño. Una señal eléctrica sólo puede recorrer unos 15 centímetros en un nanosegundo; por cuyo motivo, ningún paso de señal puede ser más largo que esta longitud. De ello se sigue que el computador completo, que comprenderá quizás unos cuantos millones de elementos de circuito, deberá instalarse dentro de una caja cuyos lados no excedan apenas de unos centímetros. La obtención de una velocidad y de una densidad tan altas necesitarán en conjunto de una nueva tecnología electrónica.

Hasta el momento han existido dos tecnologías principales en el computador, la primera basada en los tubos de vacío y la segunda en los transistores y otros aparatos semiconductores. La introducción del transistor trajo consigo un aumento de velocidad significativo, en parte porque el transistor es un interruptor inherentemente más rápido que el tubo de vacío, pero debido también a que los transistores pueden ser empaquetados más estrechamente. En el estado actual de la tecnología de los semiconductores existe un computador de diseño no usual, el Cray-1, que ha reducido el máximo paso de señal a unos pocos metros; ello le ha permitido alcanzar un tiempo de ciclo de unos 12 nanosegundos. Sin embargo, la mejora de este tiempo en un factor adicional de 10 o más puede precisar de esfuerzos heroicos. El problema no se limita a construir los circuitos lo suficientemente pequeños como para que quepan en el volumen asignado; lo que ocurre es que los circuitos de los semiconductores de alta velocidad desprenden una gran cantidad de calor, que alcanza varios kilowatt en un computador de gran tamaño. Si los millones de transistores de alta velocidad que componen este tipo de máquina se empaquetaran conjuntamente en un espacio de unas pocas decenas de centímetros cúbicos, el calor desprendido no podría ser liberado de forma suficientemente rápida y el propio computador acabaría por fundirse.

Una nueva tecnología electrónica que promete vencer este impedimento está basada en la unión Josephson, dispositivo cuyo funcionamiento depende de dos fenómenos extraordinarios de mecánica cuántica: la superconductividad y el efecto "túnel" de los electrones a través de una barrera aislante. La unión Josephson puede actuar de interruptor, dirigiendo una señal a un circuito o a otro en forma análoga a la del tubo de vacío y a la del transmisor. La unión Josephson es el interruptor más rápido conocido: puede cambiar de estado en poco menos de seis picosegundos o seis billonésimas de segundo. Este valor es menor que el 1 por ciento del tiempo del ciclo contemplado de un nanosegundo y resulta, como mínimo, 10 veces más rápido que el correspondiente a un aparato a semiconductores equivalente de alta velocidad. Los circuitos de unión Josephson pueden también almacenar información, lo cual permite su adopción para las dos unidades funcionales principales de un computador: el procesador y la memoria. Y lo que es más importante, como la unión Josephson es un dispositivo superconductor su consumo de potencia es sumamente pequeño, del orden de microwatt. Unos cuantos millones de circuitos de uniones Josephson disiparían sólo algunos watt. El conjunto podría ser empaquetado tan estrechamente como lo permitieran los métodos de fabricación. Otra consecuencia del empleo de un aparato superconductor es que las uniones deben ser enfriadas hasta temperaturas de unos pocos grados sobre el cero absoluto; el computador de unión Josephson sólo podría operar cuando estuviera sumergido en un baño de helio líquido.

En los últimos años se han desarrollado todos los elementos básicos del circuito requeridos para un computador de unión Josephson. Estos elementos incluyen los aparatos lógicos necesarios para procesar información y las células de memoria precisas para almacenarla. Un

UN MONTAJE SUPERCONDUCTOR podría servir de base a un computador digital que operaría a una velocidad 50 veces más rápida que la de los computadores de más alta velocidad fabricados hoy en día. Los elementos básicos del circuito del computador, algunos de los cuales pueden verse montados en el conjunto experimental de la derecha, se denominan aparatos de unión Josephson. Una unión Josephson consta de dos superconductores separados por una delgada capa de aislamiento; aquí las uniones descansan sobre los cuatro pequeños círculos visibles en cada región marrón. Las uniones y los lazos metálicos que se extienden a cada lado constituyen los interferómetros Josephson que funcionan como interruptores de acción extremadamente rápida. Todos los circuitos que necesitan procesar y almacenar información binaria pueden ser construidos con tales aparatos. Los diagramas del circuito se depositaron por fotolitografía en la superficie de una pastilla de silicio; las líneas más estrechas tienen una anchura de 2,5 micrometros. Los superconductores tendrán múltiples aplicaciones. Los colores obedecen al fenómeno de la interferencia de la luz con las varias capas de material. La pastilla fue fabricada en el Centro de Investigación Thomas J. Watson, de la International Business Machines. La fotomicrografía fue realizada por Fritz Goro y Hans Luhn, de IBM, utilizando un microscopio Zeiss Axiomat.

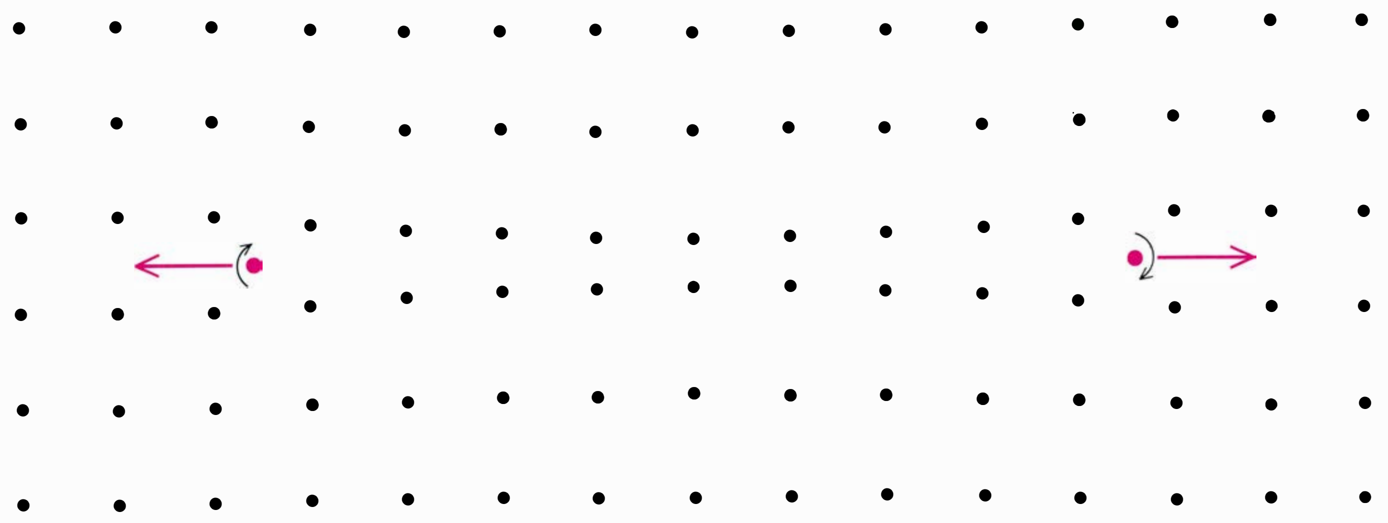

64

computador basado en estos componentes prototipo difícilmente alcanzaría la velocidad de un nanosegundo, pero hay que señalar que el desarrollo de esta tecnología acaba de empezar. El primer computador que se fabrique llenará el volumen de un cubo de cinco centímetros de lado y tendrá un tiempo de ciclo de unos dos nanosegundos. En lo que sigue, describiré lo que probablemente será tal tipo de computador y la forma en que se fabricará. Sin embargo, es necesario en primer lugar comentar los dos fenómenos físicos en los que se basa esta tecnología: la superconductividad y el efecto túnel de los electrones.

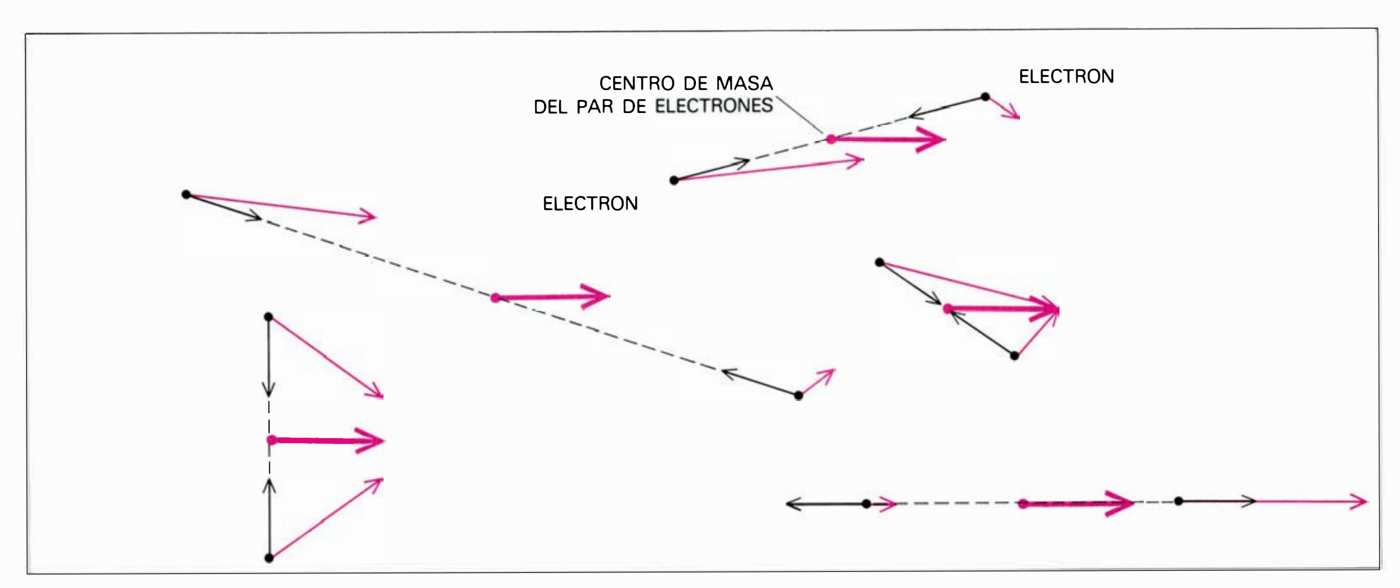
Un superconductor no es simplemente un metal con resistencia nula al paso de la corriente eléctrica. Podemos imaginarnos ese tipo de metal: a medida que se fuera enfriando, su resistencia disminuiría suavemente, sin discontinuidades, y sólo llegaría a ser nula a la temperatura del cero absoluto. Si un campo magnético estuviera presente en el instante en que se desvaneciera la última traza de resistencia, el campo quedaría atrapado en el metal.

El tema de la superconductividad es bastante diferente. A medida que el material se va enfriando, la resistencia cae gradualmente hasta un límite que se alcanza para una temperatura umbral, cuyo valor típico es de varios grados Kelvin por encima del cero absoluto; la resistencia remanente desaparece entonces con brusquedad. Además, cualquier campo magnético es expulsado del superconductor.

La superconductividad fue observada inicialmente en 1911 (por Heike Kamerlingh Onnes), pero no se dio una explicación satisfactoria del fenómeno hasta 1957 (por John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer, de la Universidad de Illinois). Sabemos hoy que un superconductor difiere de un metal ordinario, incluso de un metal ordinario con resistencia nula, en el propio mecanismo de la conducción eléctrica. En el metal normal la corriente consta de simples electrones y la resistencia se debe a las colisiones de éstos con los átomos del metal. En el superconductor, la corriente es transportada por pares de electrones; cada par se halla unido por una



MECANISMO DE CONDUCCION en un superconductor. Difiere del correspondiente a un metal ordinario, incluso del de un metal hipotético que presente una resistencia nula al paso de una corriente eléctrica. En el superconductor, la corriente es transportada no por electrones independientes sino por pares de electrones, unidos conjuntamente de modo indirecto a través de una interacción con la estructura reticular de los iones metálicos. La carga negativa de un electrón distorsiona ligeramente la red, creando una región de acumulación de carga positiva que atrae al segundo electrón.

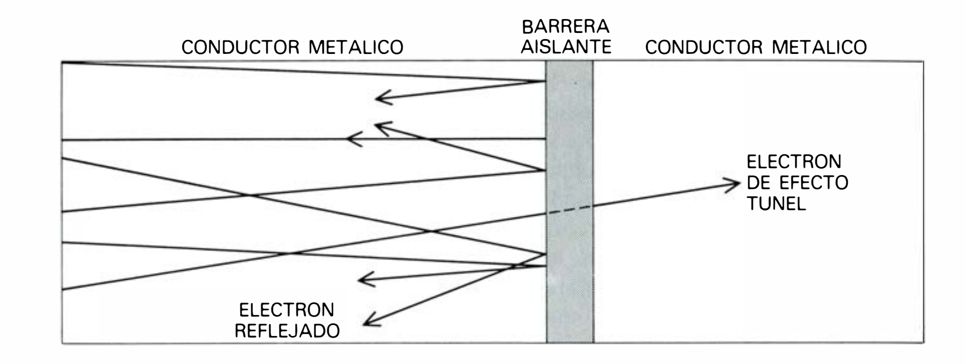


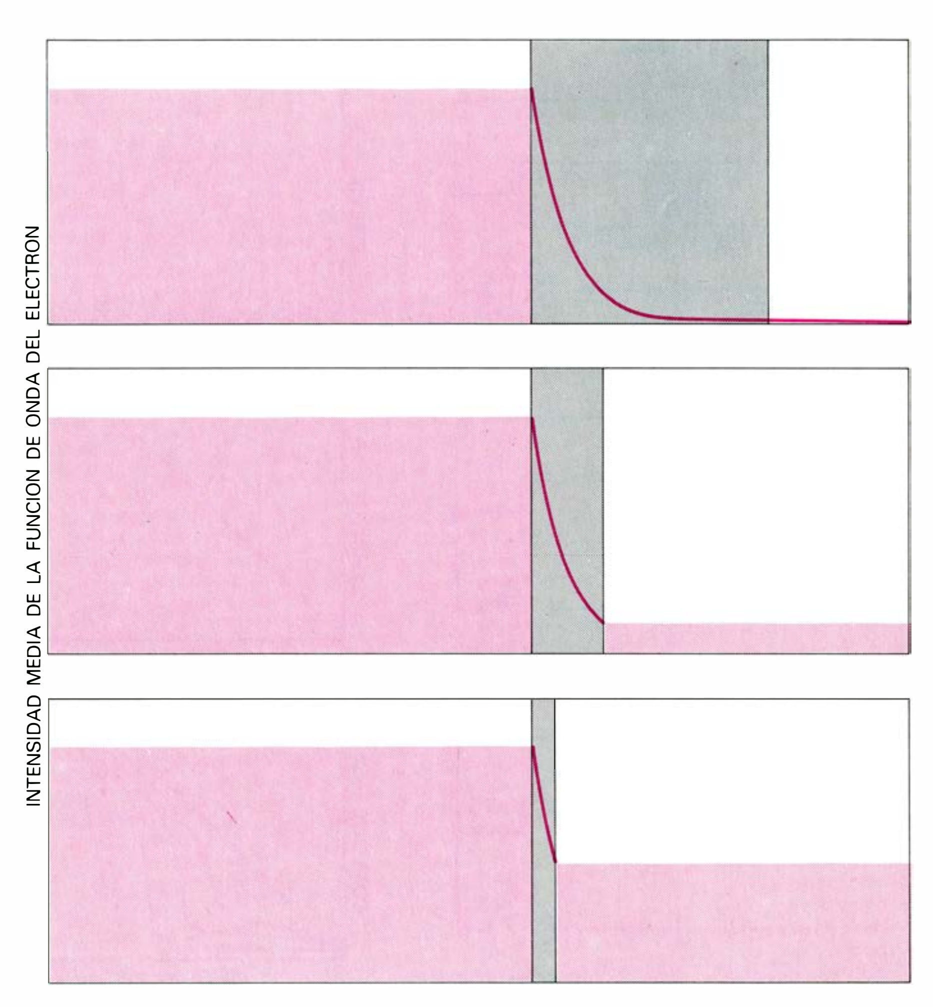
MOVIMIENTO COHERENTE de los pares de electrones en un superconductor. Este movimiento es el responsable del flujo de corriente sin resistencia. Cada par, cuando se contempla desde su propio armazón de referencia (*puntos y flechas grises*), está formado por electrones que se mueven en direcciones opuestas. Sin embargo, el movimiento total de los electrones (*flechas de color claro*) es tal que los centros de masas de todos los pares (*puntos coloreados*) tienen el mismo momento (*flechas de color intenso*). Aquí, los centros de masas se mueven hacia la derecha, significando que fluye una corriente en aquella dirección. Todos los pares pueden tener el mismo momento con la condición de que ninguno de los electrones se disperse por la estructura reticular; tal dispersión constituye el origen de la resistencia. Los electrones de un mismo par tienen momentos opuestos.

interacción débil con la estructura reticular del metal que lo rodea. Los pares consisten en dos electrones de momento opuesto, es decir, dos electrones que se mueven con igual velocidad en direcciones opuestas.

En la teoría de Bardeen-Cooper-Schrieffer cada par de electrones puede estudiarse como si fuera una partícula única situada en el centro de masas de los dos electrones. Si bien los electrones individuales tienen una considerable libertad de movimientos, es obvio que los movimientos de los centros de masa de los pares de electrones son altamente coherentes. De hecho, todos los centros de masa poseen el mismo momento. Si no existe circulación de corriente y, por tanto, no hay un movimiento neto de cargas, todos los pares tienen un momento total nulo. Si fluye una corriente, todos los pares portan el mismo momento neto dirigido paralelamente a la corriente. Como los pares se mueven en escalera de caracol no colisionan con los átomos de la estructura reticular y la conductividad es infinita.

La fuerza que une conjuntamente los dos electrones para formar un par es de tipo indirecto. La carga eléctrica negativa de cada electrón atrae las cargas positivas de los iones metálicos circundantes; distorsiona así ligeramente la red creando una región con mayor densidad de carga positiva. Esta carga atrae al otro electrón. La fuerza de unión es extremadamente débil, razón por la cual los pares se disocian con facilidad. La energía requerida para desintegrar un par es la denominada energía de intervalo. Puede suministrarse prontamente por medio de una excitación térmica de los electrones: este es el motivo por el cual la superconductividad se observa sólo a bajas temperaturas. Puede también obtenerse mediante un campo magnético o una corriente eléctrica suficientemente intensos. Como resultado de ello, si un superconductor se expone a un campo magnético demasiado intenso o se le hace transportar una corriente demasiado elevada, se extingue la superconductividad y el material pasa al estado metálico, en el cual la corriente es transportada por electrones aislados.





EFECTO TUNEL DE LOS ELECTRONES, que posibilita el paso de una carga eléctrica a través de una barrera aislante dispuesta entre dos conductores. En la física clásica todos los electrones serían reflejados por ese tipo de barrera, pero en la mecánica cuántica existe alguna probabilidad de que un electrón aparezca al otro lado. La probabilidad de encontrar un electrón en cualquier punto viene dada por la intensidad en aquel punto de la onda asociada con el electrón. En la barrera, la intensidad de la onda no cae inmediatamente a cero, sino que disminuye suavemente siguiendo una curva exponencial. Si la barrera es muy delgada puede aparecer una corriente de electrones debida al efecto túnel.

En mecánica cuántica, los electrones pueden representarse no sólo como partículas sino también como ondas. De un modo análogo, cada par de electrones de un superconductor puede ser representado por una onda única. La correlación del momento del par implica que todas las ondas tengan la misma longitud de onda y la misma fase. En otras palabras, en cada instante y para cualquier punto del volumen entero del superconductor todas las ondas de los pares de electrones se hallan en el mismo estado de su ciclo. La representación ondulatoria del movimiento de la partícula es esencial para la comprensión del efecto túnel de los electrones en los metales normales y del efecto túnel de los electrones o de los pares de electrones en los materiales superconductores; esto último es lo que tiene lugar en una unión Josephson.

El proceso denominado efecto túnel hubiera sido considerado imposible en la física clásica que precedió al desarrollo de la mecánica cuántica. El efecto túnel permite que un electrón móvil u otra partícula atraviese una barrera que se opone a su movimiento incluso cuando la partícula posee una energía insuficiente para sobrepasar la barrera. La partícula móvil puede compararse a una bola que gira a lo largo de una superficie plana y que llega a continuación a una colina. Según la física clásica, la bola

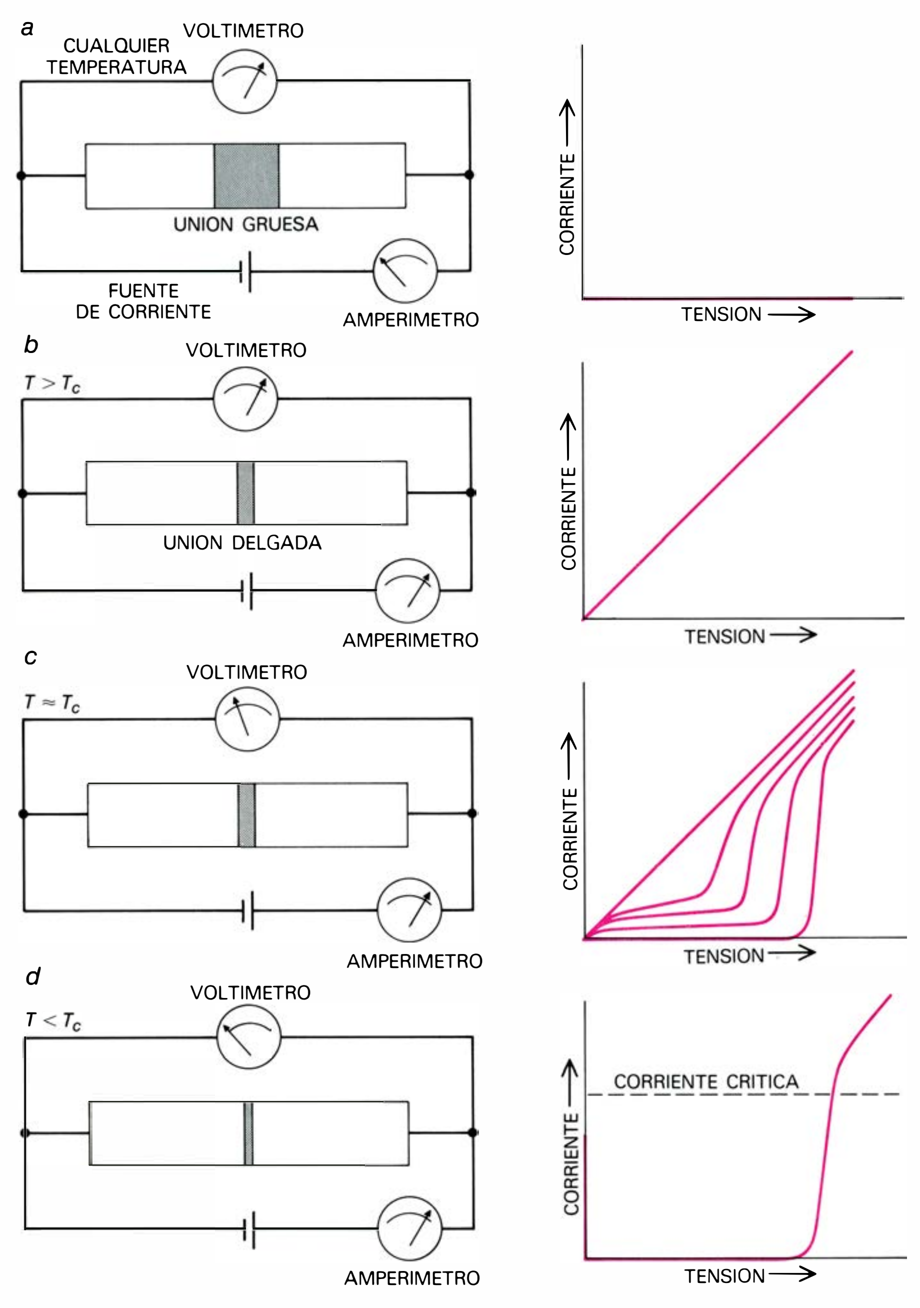
aparecerá finalmente al otro lado de la colina sólo si posee la energía cinética suficiente para alcanzar la cima. Por su parte, la mecánica cuántica predice que existe alguna probabilidad de que la bola aparezca al otro lado de la colina aun cuando su energía sea demasiado pequeña para llevarla hasta la cima. Se dice que, gracias al efecto túnel, la bola ha pasado a través de la barrera representada por la colina (si bien, como es natural, no se deja ningún agujero en la barrera). En objetos macroscópicos tales como bolas y colinas, la probabilidad del efecto túnel es nula, mas para un electrón enfrentado a una barrera delgada, la probabilidad puede ser apreciable.

El efecto túnel se hace más asequible cuando consideramos el electrón como una onda. La probabilidad de encontrar el electrón en cualquier punto del espacio viene dada entonces por la intensidad de la onda en aquel punto; la intensidad, a su vez, es simplemente el cuadrado de la amplitud de onda. En una barrera, la amplitud de la onda mecánico-cuántica no cae inmediatamente a cero; en lugar de ello, desciende poco a poco, siguiendo una curva exponencial, de modo tal que existe alguna probabilidad de encontrar la partícula al otro lado. La forma lenta o rápida con que la función de onda disminuye depende de la altura y del espesor de la barrera. Debe advertirse que si la altura o el espesor se redujeran a cero, la mecánica clásica y la mecánica cuántica coincidirían: ambas predecirían una probabilidad igual a 1 de encontrar finalmente la partícula a cualquier lado de la barrera (que ahora falta), ya que la partícula podría moverse con libertad a través del espacio disponible. Sin embargo, tan pronto como la barrera adquiere algo de espesor o de altura, la mecánica clásica exige que la probabilidad varíe discontinuamente, pasando a 0 a un lado de la barrera y a 1 en el otro lado. La mecánica cuántica proporciona una variación suave en las probabilidades. Alcanzan los valores 0 y 1, y corresponden de nuevo a la predicción clásica, sólo cuando la barrera se convierte en infinitamente alta o en infinitamente gruesa.

En un electrón, el equivalente de una colina es una barrera aislante que separa dos conductores metálicos. Supongamos que se aplica una tensión a través de tal tipo de unión. De acuerdo con la física clásica, la unión está en circuito abierto y a menos que la tensión sea lo suficientemente alta como para dar lugar al salto de un arco, no puede fluir ninguna corriente. En mecánica cuántica, existe al menos una pequeña probabilidad de que un electrón atraviese la barrera; dependiendo la probabilidad del espesor de la capa aislante (entre otras cosas). Para que circule cualquier corriente apreciable, la barrera debe ser muy delgada, típicamente menor que 100 unidades angstrom (un angstrom equivale a 10^{-8} centímetros). La existencia de tales corrientes de efecto túnel fue probada de modo concluyente a principios de la década de 1960 por Ivar Giaever, de los laboratorios de investigación de la General Electric.

Las corrientes de efecto túnel descritas hasta aquí pueden ser observadas a través de una barrera aislante dispuesta entre conductores que se encuentran normalmente en estado metálico. En 1962, Brian D. Josephson, a la sazón un estudiante graduado en la Universidad de Cambridge, calculó las corrientes que podía esperarse que fluyeran a través de una unión entre dos superconductores. Predijo varios fenómenos sorprendentes, que son denominados actualmente los efectos Josephson.

Josephson halló, como otros lo ha-

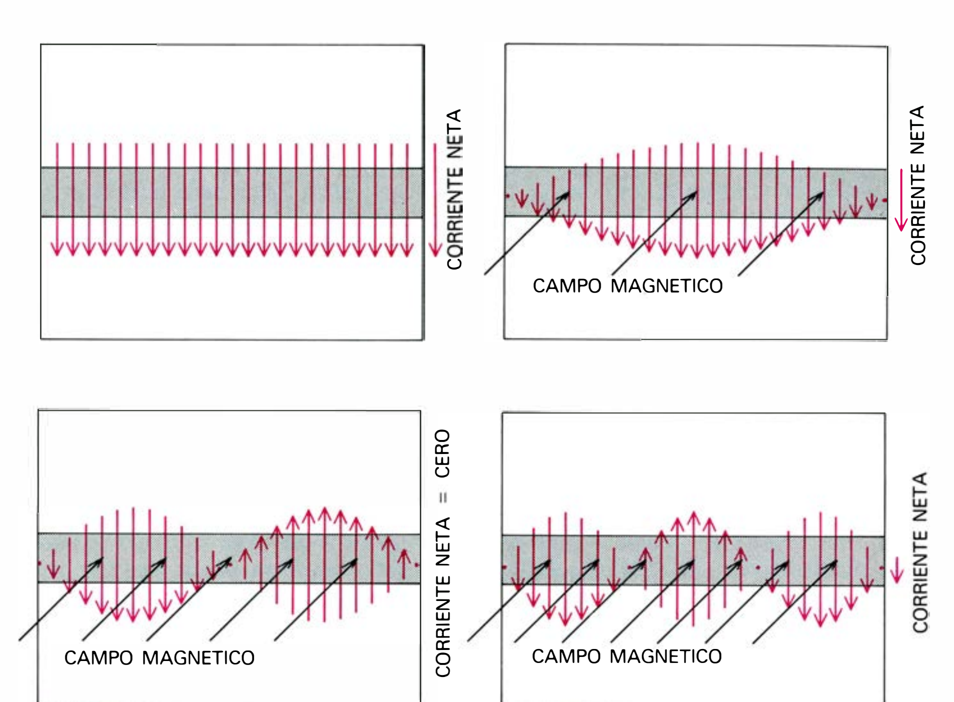


EFECTO JOSEPHSON: describe el efecto túnel de los pares de electrones a través de una barrera aislante que separa los dos superconductores. El aparato mide la corriente que atraviesa una unión y la tensión desarrollada en ella. Para una barrera gruesa a cualquier temperatura (*a*) puede aplicarse una tensión, pero no fluye ninguna corriente. Si la unión se hace más delgada, y permanece a la temperatura ambiente (*b*), se observa una corriente de efecto túnel ordinaria; la tensión y la corriente varían en proporción directa. Al refrigerar la unión a la temperatura a la cual el metal se convierte en superconductor (*c*), la relación entre la corriente de efecto túnel y la tensión de la unión se convierte en no lineal. Por debajo de la temperatura de transición de la superconducción (*d*) se contemplan dos sistemas de conducción. Mientras la corriente permanezca por debajo de un valor crítico, la unión actuará como un superconductor, no tendrá resistencia y no se medirá ninguna tensión a su través. Si se excede la corriente crítica, la tensión saltará a un valor no nulo y la unión será una barrera túnel resistiva.

bian hecho anteriormente, que una corriente normal de electrones independientes podía atravesar la unión; tales electrones libres estaban presentes en el superconductor conjuntamente con los pares unidos de electrones. Además, Josephson mostró que los electrones emparejados podían atravesar por sí mismos la unión bajo algunas circunstancias, formando una supercorriente de efecto túnel. En otras palabras, el material de la barrera, que normalmente se consideraría como un aislante, podría actuar como si fuera no sólo un conductor normal, sino incluso un superconductor. Una medición realizada a través de la unión no mostraría un circuito abierto, sino un cortocircuito perfecto, es decir, un circuito con resistencia nula.

Josephson denominó a tal tipo de unión superconductor débil. Débil, porque las interacciones causantes de la formación de los pares de electrones se extienden sólo a través de la unión en una forma atenuada. Como resultado de ello, la corriente máxima que la unión puede soportar es mucho menor que la del bloque superconductor. Del mismo modo, la superconductividad aparente de la unión es también de más fácil extinción frente a un campo magnético. Una vez que se exceden los valores de la corriente o del campo magnético máximos, la unión continúa conduciendo una corriente de efecto túnel ordinaria, pero ya no poseerá una resistencia nula. La realidad es que la resistencia puede ser bastante grande.

La presencia de un campo magnético o bien de un campo eléctrico en una unión entre superconductores da lugar a unos efectos todavía más raros. Josephson mostró que un campo magnético da lugar a una variación especial en la corriente que circula a través de la unión. Cuando el campo aplicado es cero, la densidad de corriente (la corriente por unidad de área) a través del área de la unión es uniforme. A medida que aumenta el campo magnético, la densidad de corriente toma una variación sinusoidal en magnitud y en dirección. De aquí que la corriente pueda estar fluyendo de izquierda a derecha en un punto de la unión, mientras que en otro punto es nula, y al tiempo que puede circular de derecha a izquierda en un tercer punto. Debido a esta variación espacial, la máxima corriente neta que puede ser transportada por la unión depende también sinusoidalmente de la intensidad del campo magnético. La corriente neta puede tener su mayor valor cuando el campo es cero. Cuando el campo alcanza un valor tal que existe un ciclo completo de la variación sinusoidal, corrientes iguales fluyen a la derecha y a la izquierda de tal modo que la corriente neta es cero.



CAMPO MAGNETICO que atraviesa la capa barrera de una unión Josephson. Dicho campo introduce una variación espacial en la magnitud y en la dirección de la corriente de la unión Josephson. Cuando el campo magnético es cero, la densidad de corriente es uniforme a través de la unión Josephson y en cualquier punto puede tomar su valor máximo, es decir, la corriente crítica a la cual la unión pierde sus propiedades de superconducción. Cuando se aplica el campo magnético, la densidad de corriente máxima y la dirección del flujo de corriente varían de un punto al otro, siguiendo una curva sinusoidal. La rapidez de la variación espacial o, en otras palabras, el número de semiperíodos sinusoidales, depende de la intensidad del campo. De este modo, si existe un número impar de semiperíodos, puede circular una corriente neta, pero su magnitud es reducida a partir del valor nulo del campo. Si el número de semiperíodos es par, la corriente neta es nula, pues se produce un efecto de compensación.

A medida que el campo va aumentando, adicionalmente se establece una vez más una corriente neta, si bien nunca alcanza su máximo, es decir, el valor correspondiente al campo nulo. Matemáticamente, se dice que la dependencia de la corriente neta con relación al campo magnético es una función no monótona: a medida que aumenta el campo, la máxima corriente neta disminuye primero a cero, después aumenta de nuevo, vuelve a caer a cero y así una y otra vez. La curva que describe la corriente neta en función del campo magnético aplicado es la misma que la que describe el modelo de difracción generado por la luz cuando ésta pasa a través de un orificio minúsculo o de una ranura estrecha. Philip W. Anderson y John M. Rowell, de los Laboratorios Bell, confirmaron en 1963 la existencia del efecto Josephson midiendo la máxima supercorriente sostenida en función del campo magnético aplicado y determinando que satisfacía el modelo de difracción.

La curva de respuesta de la supercorriente de la unión ante un campo eléctrico, o, en otros términos, ante una tensión a través de la unión es una variación sinusoidal con el tiempo. La corriente oscila, circulando a través de la unión, primero en un sentido y a continuación en el otro, con una frecuencia proporcional a la tensión aplicada. Cuando la tensión de la unión es cero, la corriente es continua; sin embargo, incluso una pequeña tensión puede dar lugar a la aparición de una corriente alterna de muy alta frecuencia. Por ejemplo, a una tensión de 1 miljvolt, la frecuencia es aproximadamente de 500 gigahertz, o sea, 500.000 millones de ciclos por segundo.

Los efectos Josephson pueden resumirse en la forma siguiente. En ausencia de un campo magnético y con una corriente inferior a un valor crítico, fluye una supercorriente a través de la unión Josephson justamente como si el superconductor no fuera interrumpido por la barrera aislante. No puede medirse ninguna tensión a través de la unión. Cuando se aplica un campo magnético aparece una variación espacial en la supercorriente; si el campo es suficientemente fuerte, la supercorriente queda abolida y aparece una tensión a través de la unión. Del mismo modo, si la corriente a través de la unión excede de un valor crítico, se pierde la propiedad de la superconducción y aparece una tensión; en respuesta a esta tensión se genera en la unión una corriente alterna de alta frecuencia.

Las uniones Josephson han sido empleadas en las mediciones de constantes fundamentales; en la actualidad una unión túnel Josephson define el standard de tensión de Estados Unidos. Se han empleado también las uniones en la fabricación de instrumentos extraordinariamente sensibles para medir campos magnéticos. A mediados de la década de 1960 realicé las primeras investigaciones que se llevaron a cabo sobre el efecto Josephson tomándolo como base para su aplicación a la lógica del computador y a los aparatos de memoria.

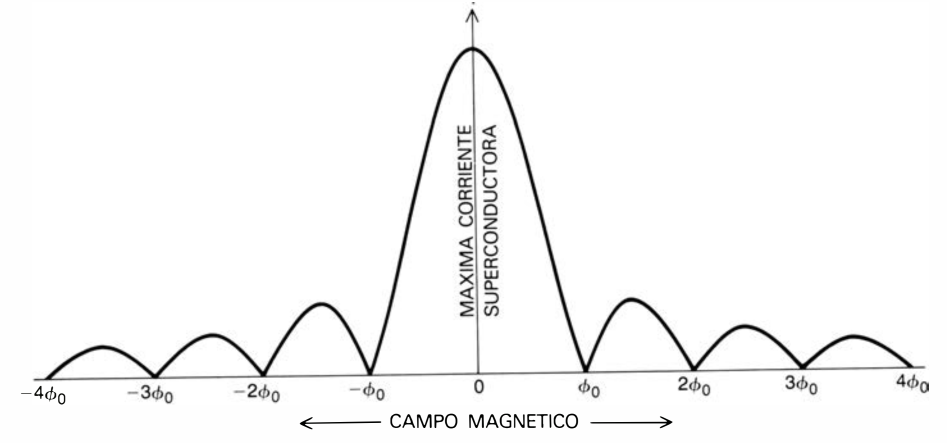
El posible elemento lógico más sencillo de unión Josephson consiste en un interruptor único. Dos películas de un metal, que puede ser plomo o niobio, están separadas por una capa delgada de aislante. En la parte superior del conjunto completo se coloca un tercer conductor, la línea de control, aislada de los otros dos conductores por un recubrimiento aislante mucho más grueso. El plomo y el niobio son los metales que se emplean más a menudo, porque poseen temperaturas de transición a superconductividad comparativamente altas: 7,2 y 9,4 grados Kelvin, respectivamente. De aquí que estén muy por debajo de su estado de transición correspondiente a la temperatura del helio líquido (4,2 grados Kelvin). La barrera está fabricada usualmente del óxido del metal de la unión; en general, los óxidos son aislantes excelentes.

Durante el funcionamiento, se conecta un lado de la unión a través de una resistencia a una fuente de corriente y también a un aparato de salida. El otro lado de la unión está conectado a la tierra eléctrica del sistema. Si la corriente de alimentación permanece por debajo del valor crítico, pasa a través de la unión en el estado de superconducción. Por consiguiente, la unión proporciona un cortocircuito directo, de la alimentación a tierra, y así no circula ninguna corriente hacia el aparato de salida. Sin embargo, si se hace circular una corriente a través de la línea de control, da lugar a la aparición de un campo magnético que penetra en la capa de unión. En presencia de este campo, la unión no puede transportar por más tiempo toda la corriente de alimentación en el estado de superconducción, y, por tanto, conmuta al estado resistivo. Como resultado de ello aparece una tensión a través de la unión y la mayor parte de la corriente de alimentación es desviada hacia la línea de salida. La resistencia de la unión en el estado de falta de superconducción puede alcanzar valores de varios cientos de ohm; de este modo, la unión forma un interruptor casi ideal. Posee la característica de dirigir la corriente ya sea directamente a tierra a través de la unión o bien hacia el aparato de salida.

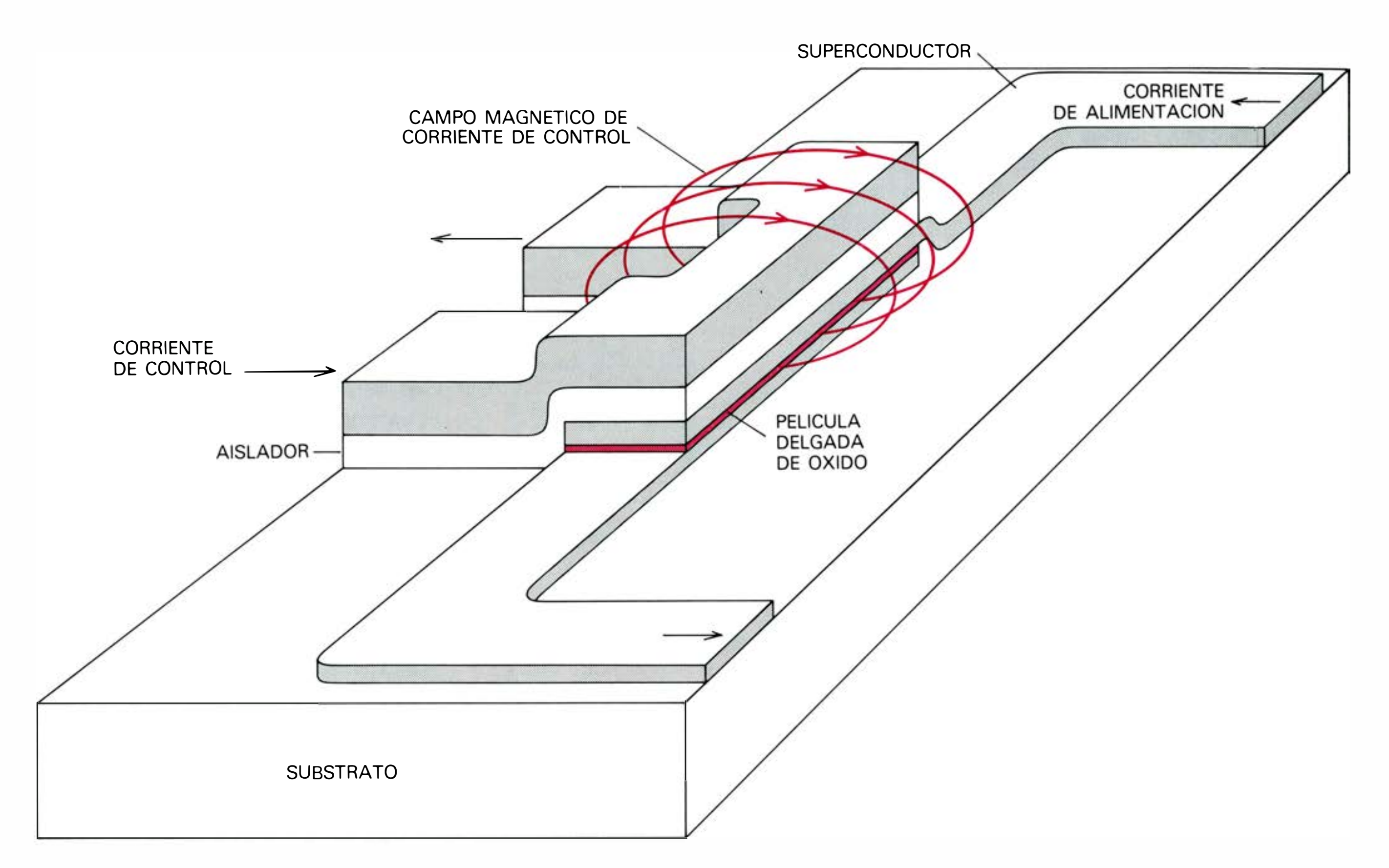
Tres razones me atrajeron a investigar tales aparatos: el presentimiento de que podían ser conmutados rápidamente de un estado a otro, su evidente bajo consumo de potencia y el hecho de que poseen ganancia, ya que la corriente de salida puede ser mayor que la corriente de conmutación aplicada a la línea de control. Estas suposiciones fueron confirmadas por los experimentos iniciales realizados en 1965 y 1966 en mi laboratorio y en el Centro de Investigación Thomas J. Watson, de la Internacional Business Machines Corporation (IBM).

La sensibilidad de una unión Josephson frente a un campo magnético aplicado aumenta con el área de la unión, lo que es un buen argumento para fabricar aparatos de suficiente tamaño para que las corrientes de control sean reducidas a un mínimo. Sin embargo, la velocidad de conmutación de la unión disminuye a medida que el área aumenta. En los aparatos de reciente fabricación, las demandas conflictivas de velocidad y de sensibilidad se satisfacen mediante la sustitución de una unión única por dos o más uniones conectadas a través de un lazo con superconducción continua. Este aparato multiunión se denomina interferómetro Josephson o dispositivo superconductor de interferencia de cuantos (SQUID). Tal tipo de interferencia se parece mucho a la interferencia de las ondas luminosas. Siempre que, para una unión única, el gráfico de la corriente máxima en función del campo magnético reproduzca el modelo de difracción de la luz que pasa a través de una sola ranura, el correspondiente gráfico para un interferómetro Josephson de dos uniones produce el modelo de interferencia de la luz al pasar a través de dos ranuras paralelas. Esta similitud no es pura coincidencia. En un lazo superconductor cerrado que incluye dos uniones Josephson, cualquier perturbación de las ondas de los pares de electrones en una unión se comunica inmediatamente a la otra unión. Las ondas de interferencia están en fase para algunos valores del campo, de modo que interaccionan constructivamente y la corriente máxima puede circular a través del aparato; otros valores del campo conducen a una interferencia destructiva y, por consiguiente, anulan la supercorriente. En un aparato con tres o cuatro uniones el modelo de interferencia es más complicado, pero el principio fundamental sigue siendo el mismo.

La tensión de funcionamiento de una unión Josephson viene determinada por la tensión de intervalo y, en consecuencia, por la energía de enlace de un par de electrones superconductores. El valor de la tensión de intervalo depende a su vez del material y de la temperatura de operación. La tensión de intervalo tiene su valor máximo en el cero absoluto y disminuye a cero a la temperatura de transición a la superconductividad. En los materiales que son candidatos para ser utilizados en la tecnología del computador, la tensión de funcionamiento es de alrededor de tres milivolt, unas mil veces más pequeña que las tensiones típicas utilizadas en los dispositivos de semiconductores. Las corrientes que circulan en los circuitos superconductores vienen determinadas por la probabilidad del efecto túnel a través de las uniones Josephson y, por tanto, por la naturaleza de la capa de óxido y de su espesor. Las corrientes típicas son de unas pocas décimas de miliampère.



SOBRECORRIENTE MAXIMA que puede mantener una unión Josephson; se trata de una función oscilante del campo magnético aplicado. El gráfico tiene la misma forma que el correspondiente a la amplitud de las ondas luminosas difractadas al pasar a través de una ranura. El hecho de que pueda ser transportada una mayor corriente para un campo magnético nulo que para cualquier otro valor ofrece un método sencillo para conmutar una unión Josephson desde el estado de superconducción al estado resistivo. En ausencia de un campo magnético se establece una supercorriente de valor próximo a la máxima admisible. Cuando se introduce un campo magnético, la unión desarrolla una resistencia.



INTERRUPTOR DE UNION JOSEPHSON. Conmuta desde el estado de superconducción al estado resistivo mediante la aplicación de un campo magnético. La unión consiste en dos bandas de metal superconductor, tal como una aleación de plomo, separadas por una película delgada del óxido del metal. Una línea de control independiente queda aislada de los electrodos de la unión por una capa de óxido mucho más gruesa. La unión está inicialmente en el estado de superconducción, de modo tal que la corriente de alimentación es derivada directamente a tierra sin resistencia. Un impulso de corriente en la línea de control provoca la aparición de un campo magnético que penetra en la capa de la unión y anula la superconductividad. En respuesta a ello, se desarrolla a continuación una tensión a través de la unión. La superconductividad retorna si se interrumpe la corriente.

Propiedad peculiar de los interruptores de unión Josephson es que se trata de circuitos de enclavamiento. Una vez que un impulso de corriente, que pasa a través de la línea de control, convierte la unión desde el estado superconductor al estado resistivo, el interruptor permanece en este último estado incluso después de anularse la corriente de control. En verdad, cualesquiera entradas adicionales a la línea de control no tienen ningún efecto sobre el circuito. La razón estriba en que una vez que el aparato ha conmutado, existe una tensión a través de la unión que por sí misma impide el restablecimiento de una supercorriente. El aparato sólo puede ser reajustado al estado de resistencia nula mediante la interrupción momentánea de la corriente de alimentación.

Si bien hay contextos en los cuales conviene el enclavamiento automático de los circuitos, la mayoría de los aparatos lógicos de la unidad central de procesamiento de un computador deben ser reajustados al final de cada ciclo de máquina. El enclavamiento inevitable de los aparatos de unión Josephson dificulta, pues, el diseño de una fuente de alimentación para el computador: éste debe ser capaz de interrumpir, al final de cada ciclo, la alimentación a todos los circuitos lógicos.

Otra característica de los aparatos de unión Josephson proporciona el camino para una ingeniosa solución de este problema: la unión Josephson es indiferente al sentido de circulación de la corriente que fluye a su través. En un semiconductor, es de la mayor importancia la polaridad de las tensiones; y tanto es ello así que la fuente de alimentación de un computador de semiconductores debe proporcionar una corriente continua de polaridad fija. Por otro lado, en una unión Josephson el intercambio de todas las tensiones positivas y negativas en el sistema, para invertir así el sentido de todas las corrientes, no influye en el funcionamiento del aparato. Por este motivo, la red lógica del computador puede ser alimentada por una corriente alterna. Al inicio del ciclo la fuente de alimentación se conecta y suministra corriente a los aparatos lógicos; al final del ciclo, la tensión de alimentación cae a cero, reajustando la red lógica. Cuando se inicia el nuevo ciclo, se repite el proceso, pero la fuente de alimentación tiene la polaridad opuesta.

Todas las funciones lógicas y aritméticas de la unidad de procesamiento central del computador digital pueden definirse en términos de dos circuitos: La puerta *O* y la puerta *Y*. Existen circuitos que generan una señal de salida única según los valores de dos o más señales de entrada. Una puerta *O* da una señal de salida de "verdadero", o un 1 lógico, si alguna de sus entradas es 1; la señal de salida es "falso", o 0 lógico, si y sólo si ninguna de las entradas es 1. La puerta *Y* tiene una señal de salida de 1 si y sólo si todas sus entradas son 1; de otro modo, la salida será 0. En un computador de unión Josephson la presencia de una corriente en la línea de salida denota un 1 lógico mientras que la ausencia de tal corriente representa un 0.

Una puerta *O* de dos entradas puede estar formada por un único interferómetro Josephson que se halle equipado con dos líneas de control. Al inicio de un ciclo de la máquina, este aparato de doble entrada se halla en el estado de superconducción y toda la corriente de alimentación deriva, a su través, hasta la tierra eléctrica del sistema. Una señal en cualquiera de las líneas de control conmuta la unión al estado resistivo y, por tanto, la corriente de alimentación se dirige hacia la línea de salida. Por consi-

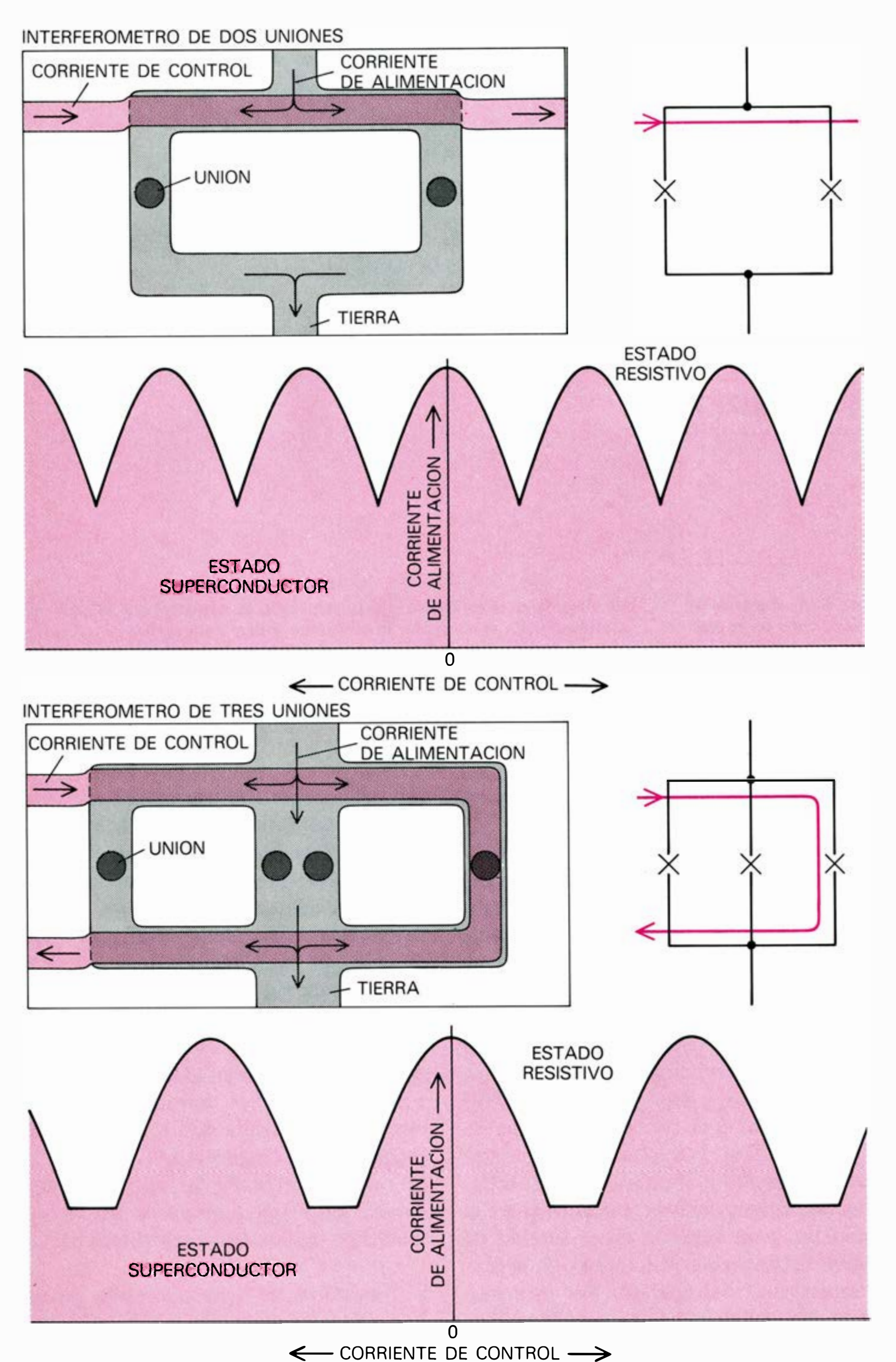
guiente, aparece una señal de salida si cualquiera de las líneas de control recibe una señal o si ambas reciben señales. La salida de la puerta puede servir de entrada para otro interferómetro, o puede controlar realmente una serie completa de aparatos.

La disposición más prometedora de los elementos del circuito para ejecutar la función *Y* es algo más complicada. Incluye un interferómetro Josephson de uso especial, denominado aparato de inyección de corriente, conmutado no por un campo magnético sino por la corriente que fluye a través de las uniones. El aparato de inyección de corriente, que fue proyectado por Tushar Gheewala, del Centro de Investigación Watson, actúa como un sumador; ello significa que responde a la suma de las dos señales de entrada.

Las entradas a la puerta *Y* se aplican en un comienzo a las líneas de control de dos interferómetros convencionales; son las líneas de salida de estos circuitos las que gobiernan el aparato de inyección de corriente. Al inicio de un ciclo, el aparato de inyección se encuentra en el estado de superconducción y transporta una corriente desde la fuente de alimentación a tierra. Puede absorber la corriente adicional desde cualquiera de los circuitos de entrada sin conmutar al estado resistivo; pero si ambas entradas están presentes, se supera la máxima corriente de unión de superconducción. A continuación, el aparato conmuta y se desvía la corriente de alimentación hacia la salida. El aparato de inyección de corriente consiste en dos interferómetros de unión en los cuales el lazo de superconducción conecta las uniones asimétricamente: un brazo posee una mayor inductancia que el otro. La configuración asimétrica mejora la conmutación cuando se presentan simultáneamente dos entradas, pero la inhibe cuando sólo se recibe una señal de entrada.

En el procesador central se combinan las puertas *O* e *Y* junto a otras pocas clases de circuitos para formar unidades funcionales que operan de acuerdo con las instrucciones proporcionadas por un programa de computador. Por ejemplo, una red de puertas puede llevar a cabo la operación de la suma: dados dos números (en forma binaria) como entrada, calcularía su suma como salida. Otro conjunto de puertas puede comparar dos números binarios, emitiendo como salida un 1 lógico, si son iguales, o 0 lógico, si son diferentes. Las funciones seleccionadas durante cualquier ciclo de máquina vienen determinadas por las instrucciones que alimentan el programa. Las propias instrucciones son decodificadas por otra red de puertas. La organización de estas muchas unidades, o bien lo que viene a denominarse la arquitectura del computador, no tiene por qué ser distinta en un computador de unión Josephson de lo que es en un computador basado en la tecnología de los semiconductores.

Al comienzo de un ciclo de máquina, los datos con que hay que operar y las instrucciones que especifican la operación se almacenan conjuntamente en circuitos denominados de enclavamiento o en redes de enclavamiento denominadas registros. Los circuitos de enclava-

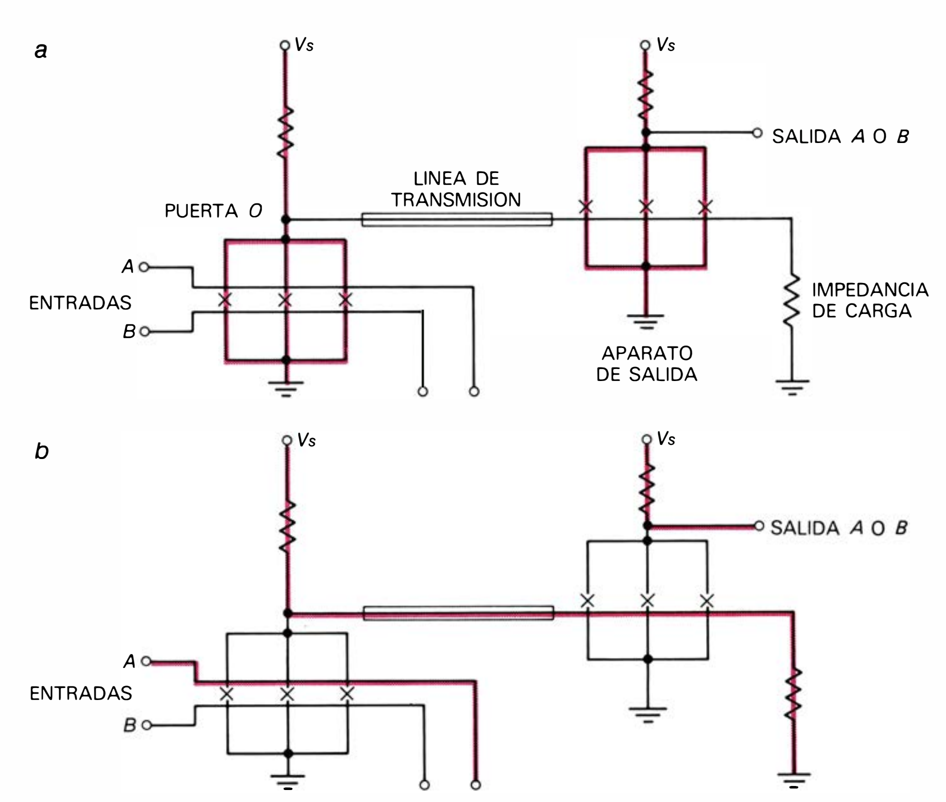


INTERFEROMETROS DE MULTIUNION, más sensibles; conmutan más rápidamente que un simple interruptor de una unión. Estos aparatos se denominan interferómetros porque la supercorriente máxima que pueden conducir viene determinada por la interferencia de las ondas de los pares de electrones en dos o más uniones. Para algunos valores del campo magnético la interferencia es constructiva y las uniones mantienen su superconductividad; para otros valores del campo, la interferencia destructiva convierte el aparato al estado resistivo. Para el interferómetro de dos uniones (*diagrama superior*) la curva que relaciona la corriente de alimentación superconductora máxima con la corriente de control tiene la misma forma que el diagrama de interferencia generado por la luz que pasa a través de dos ranuras paralelas. El interferómetro de tres uniones (*diagrama inferior*) produce una curva umbral equivalente al diagrama de interferencia de tres ranuras, semejante a la de las ondas luminosas. (Por conveniencias de fabricación, el aparato de tres uniones se fabrica actualmente con cuatro uniones, pero dos de ellas están tan próximas en conjunto que pueden ser consideradas como una sola unidad.)

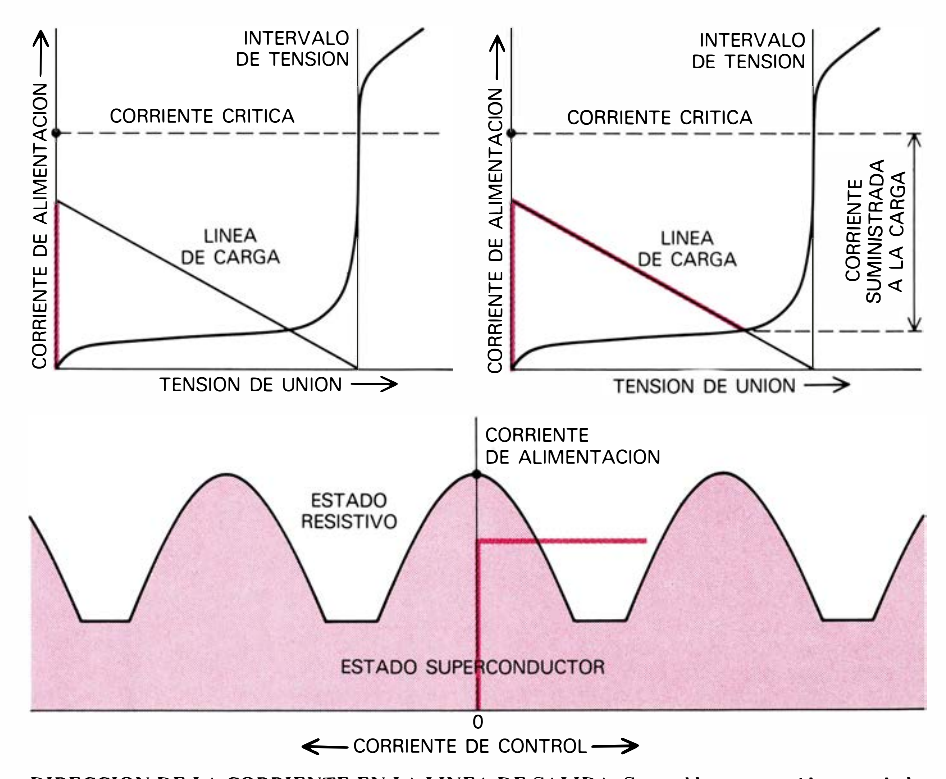
miento y los registros, al contrario de lo que ocurre con los sistemas de puertas que contienen el procesamiento lógico y aritmético de la información, deben ser alimentados continuamente para que la información no se pierda entre los ciclos. A una señal procedente del reloj maestro, la siguiente instrucción a ejecutar es decodificada produciendo un conjunto de señales que controlan la configuración de los varios elementos lógicos. A continuación, las señales binarias que representan los datos se insertan en la red lógica donde son transformadas de acuerdo con la instrucción decodificada. Antes de que termine el ciclo y de que se reajusten las puertas lógicas, los datos transformados deben ser almacenados en otro conjunto de registros. Para algunas instrucciones, la ejecución completa puede requerir más de un ciclo. En estos casos, la instrucción debe dividirse en una secuencia de operaciones elementales, cada una de las cuales puede realizarse dentro de un ciclo.

La velocidad máxima del procesador central viene determinada por el tiempo necesario para el cambio de estado de una puerta individual, por el número de puertas a través de las que debe pasar una señal y por la velocidad con que las señales se mueven desde una puerta hasta la siguiente. Como todas las operaciones deben terminar antes del final de un ciclo, el tiempo de éste debe ser lo suficientemente prolongado como para permitir que el peor caso pueda realizarse.

El tiempo requerido para que una señal pase desde la entrada de una puerta hasta la entrada de la siguiente puede dividirse en dos partes: un retardo de conmutación, en el cual la unión Josephson cambia del estado de superconducción al estado resistivo, y un retardo de propagación, en el cual se transmite la salida de la unión al siguiente aparato. La conmutación de un aparato de unión Josephson empieza cuando una corriente en la línea de control establece un campo magnético que penetra en la capa túnel. En presencia de este campo, la unión pierde su capacidad de transportar la corriente de alimentación en la forma de superconducción y aparece así una tensión a través de la unión. Una parte del retardo de la conmutación es el período requerido para que esta tensión alcance su valor último. Sin embargo, incluso después de que se haya desarrollado la tensión de la unión, la corriente no se transfiere instantáneamente a la línea de salida. La unión, que está fabricada con dos conductores separados por un aislador delgado, constituye un pequeño condensador, de forma que el



PUERTA LOGICA "O"; es un circuito básico del procesador central de un computador consistente en un interferómetro de tres uniones con dos líneas de control. Cuando el aparato se conecta por primera vez (*a*), la puerta está en estado de superconducción, de forma que la corriente de alimentación es derivada a tierra y no aparece ninguna tensión en la línea de transmisión de salida. Una señal de entrada aplicada a cualquiera de las líneas de control conmuta la puerta (*b*), y su resistencia aumenta desde cero hasta varios cientos de ohm. Como resultado, la corriente de alimentación es dirigida hacia la línea de salida, que sirve como línea de control para una segunda puerta. El aparato se denomina una puerta *O* porque puede ser abierta por una sola entrada ya sea en la línea de control *A* o en la línea de control *B;* dos entradas conmutan también el aparato. La puerta se enclava automáticamente: desarrollada una tensión, la superconductividad se recupera sólo si se corta la corriente de alimentación.



DIRECCION DE LA CORRIENTE EN LA LINEA DE SALIDA. Se establece con rapidez cuando la puerta *O* conmuta al estado resistivo. Inicialmente, la corriente de alimentación fluye a través del lazo del interferómetro a la tensión cero (*parte superior izquierda*). Una entrada provoca una disminución de la corriente crítica (*parte superior derecha*) con el resultado de que aparece una tensión a través de la unión. El estado del sistema sigue una trayectoria denominada la línea de carga, cuya pendiente viene fijada por la impedancia del circuito de salida. La pérdida de superconductividad está causada por el campo magnético generado por la corriente del control, como se indica en la ilustración inferior en color.

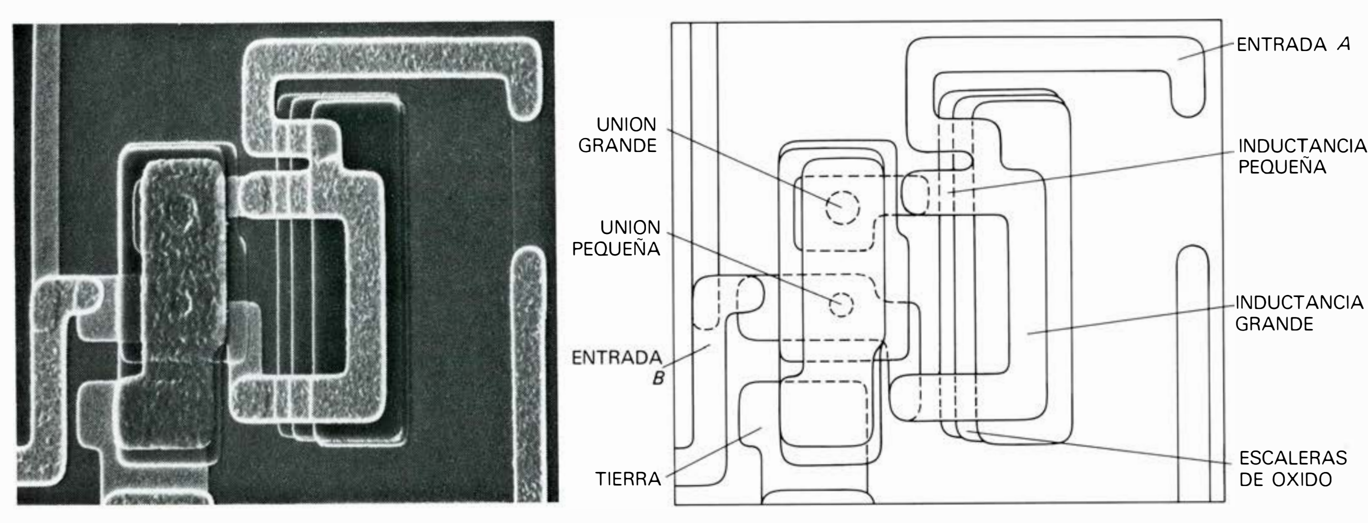
resto del tiempo de retardo de la conmutación es el necesario para cargar esta capacitancia. La capacitancia aumenta en proporción al área de la unión; aquí reside en parte la razón de que las uniones de gran tamaño conmuten con más lentitud.

El retardo total de conmutación de los interferómetros de unión Josephson aplicados a los computadores es sumamente pequeño. El tiempo de elevación, o tiempo necesario para que la señal de salida cambie desde el estado lógico 0 al umbral del estado lógico 1, es típicamente de 15 picosegundos. David B. Tuckerman, estudiante graduado que trabaja en el Centro de Investigación Watson, midió un tiempo de elevación de 10 picosegundos en una muestra de aparatos de unión Josephson. Incluso la medida de un intervalo tan fugaz fue sólo posible gracias a la tecnología de la unión Josephson.

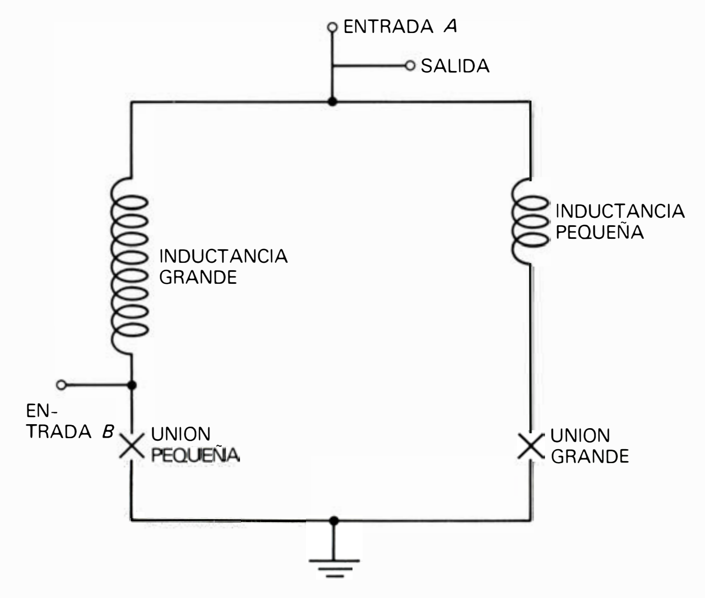
El retardo de propagación entre puertas depende obviamente de la longitud de la línea de salida y de la velocidad con que las señales pasan a través de la línea. En un computador a temperatura ambiente las propiedades de transmisión de señal de los conductores metálicos pueden restringir severamente la velocidad máxima de operación. En tal tipo de conductor, una señal con variaciones rápidas puede distorsionarse y atenuarse después de recorrer sólo unos pocos centímetros. Como resultado, la señal se difunde en lugar de propagarse como una onda.

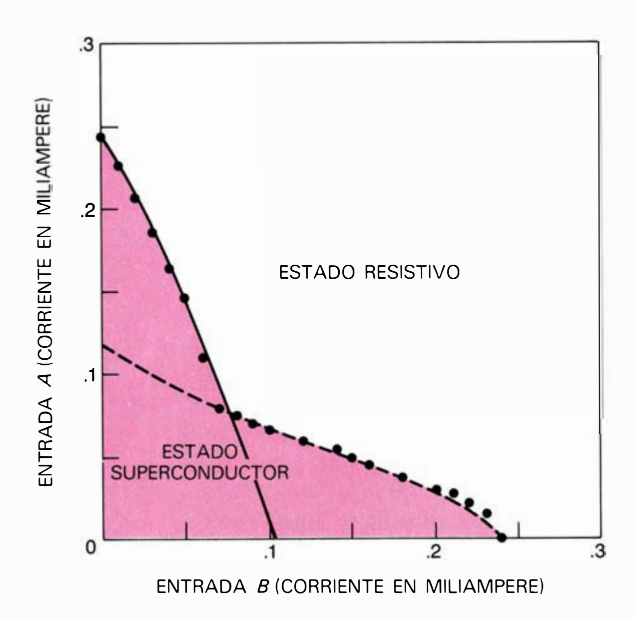
En un computador superconductor, estos problemas pueden evitarse si diseñamos el circuito de salida como una línea de transmisión superconductora con características que sean casi óptimas para la circulación de una señal de variaciones rápidas. En particular, la línea tiene una resistencia efectiva despreciable frente a las señales de todas las frecuencias inferiores a algo más de 1000 gigahertz. (Quizá pueda parecerle al lector que la resistencia de un superconductor será siempre cero, pero de hecho sólo es exactamente cero la resistencia ante una corriente constante.)

La línea de transmisión consiste en una delgada película de superconductor depositada sobre un plano de tierra su-



FUNCION LOGICA "Y", realizada por un interferómetro de uso especial denominado aparato de inyección de corriente. Una puerta *Y* produce una señal de salida sólo cuando recibe señales de entrada de todas sus líneas de entrada. A la izquierda vemos una micrografía de barrido electrónico del propio aparato, que fue proyectado por Tushar Gheewala, del Centro de Investigación Watson. Las partes componentes del aparato están marcadas en el esquema de la derecha. No se emplean líneas de control; el aparato de inyección conmuta en respuesta a las corrientes del lazo del interferómetro.





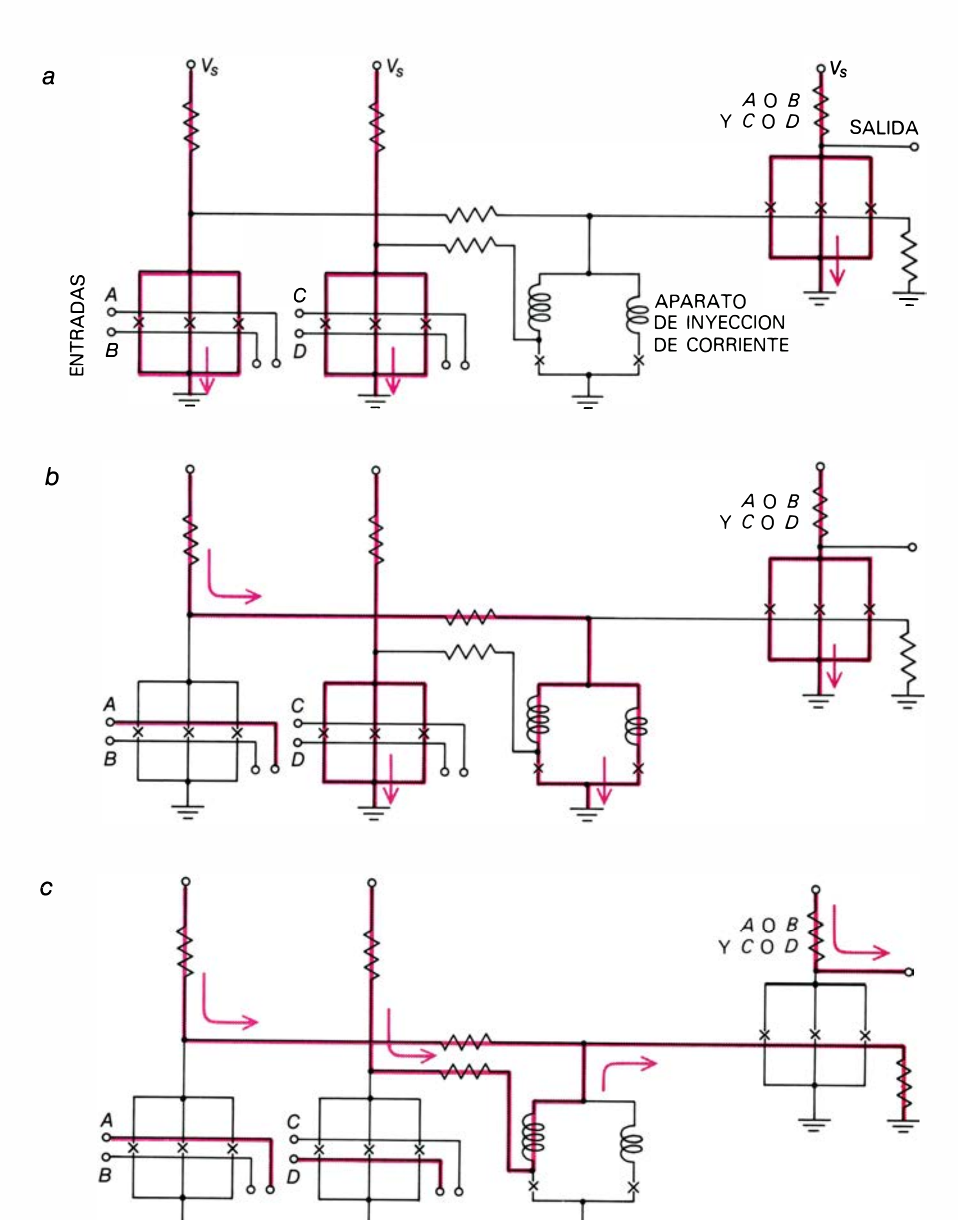
APARATO DE INYECCION DE CORRIENTE. Actúa de sumador de corrientes eléctricas; en efecto, conmuta desde el estado de superconducción al estado resistivo sólo cuando la suma de las dos corrientes excede de un umbral. Las corrientes se dividen asimétricamente en el lazo del interferómetro debido a las diferencias en inductancia. Cualquiera de las entradas por sí sola puede abrir la puerta si y sólo si la corriente supera los 0,25 miliampère. Si ambas entradas están presentes, la puerta cambia de estado aunque cada entrada suministre una corriente de sólo 0,1 miliampère.

perconductor y aislado. A través de la línea, circula un pulso de corriente en forma de onda con una velocidad de fase comprendida entre un cuarto y un tercio de la velocidad de la luz en el vacío. Una señal con un tiempo de elevación tan corto como un .picosegundo puede transmitirse escasos centímetros con muy poca distorsión o atenuación. Para impedir que la señal sea reflejada por el extremo de la línea de transmisión, ésta se termina con una impedancia que se equipara con la impedancia de la propia línea. Tales terminaciones son raramente posibles en un computador a semiconductor porque dan lugar a un aumento inaceptable en el consumo de potencia.

La salida de un solo circuito puede excitar un número indefinido de puertas. Basta para ello con disponer en serie las puertas a lo largo de la línea de transmisión. (En contraste, la salida de un circuito de semiconductores puede alimentar solamente unas pocas puertas sin amplificación intermedia.) Cada puerta añade una resistencia de carga a la línea de transmisión e introduce un retardo de unos cinco picosegundos.

Se ha medido el retardo total de los circuitos de la unión Josephson disponiendo cascadas de puertas, con la salida de una puerta conectada a la entrada de la siguiente. Para que una señal fluctúe a través de una secuencia de 10 puertas *O* es preciso un tiempo muy pequeño, del orden de los 130 picosegundos, lo que es apreciablemente menor que el retardo asociado con una puerta equivalente de semiconductor. El retardo medio de 13 picosegundos por puerta es el mínimo tiempo alcanzado en un circuito lógico. Consta de un retardo de conmutación de seis picosegundos y de un retardo de propagación de siete picosegundos. Naturalmente, una cadena lineal de 10 puertas *O* no reproduce de una manera verosímil la organización de un procesador central de un computador. En condiciones de funcionamiento más plausibles, en las cuales cada puerta tiene cuatro entradas y tres salidas, el retardo medio es de unos 35 picosegundos por puerta.

Estas mediciones se efectuaron en circuitos en los cuales los conductores más estrechos tenían una anchura de sólo 2,5 micrometros. Con este tamaño sería posible incluir 1000 puertas en una pastilla cuadrada de seis milímetros de lado. La potencia total disipada por tal pastilla sería de unos 10 miliwatt. Evidentemente, no cabe preguntarse si los aparatos podrían hacerse más pequeños, con líneas de anchura menor de un micrometro. La miniaturización de los aparatos traerá consigo una mejora sustancial



FUNCIONAMIENTO DE LA PUERTA "Y". Para ello cuenta con el aparato de inyección de corriente para sumar dos entradas. Aquí las entradas son por sí mismas puertas *O*, de modo tal que el circuito completo ejecuta la función lógica más complicada simbolizada por la expresión *A O B Y C O D*. En el estado inicial (*a*), ambas puertas *O* son superconductoras y ninguna corriente alcanza el aparato de inyección de corriente. La actuación de una de las puertas *O* da lugar a la aparición de una señal en la línea de salida (*b*), pero la señal es desviada por el aparato de inyección de corriente, que pasa al estado de superconducción. Cuando ambas puertas *O* se han abierto, la corriente que circula a través del aparato de inyección de corriente excede del nivel crítico y éste conmuta al estado resistivo (*c*). A continuación la corriente es dirigida hacia el aparato de salida. (Ilustración realizada por Gabor Kiss.)

en la velocidad con una ganancia varias veces mayor. Disminuirá la inductancia de la línea de control y la capacitancia de la unión, con la mejora consiguiente de la velocidad de conmutación. Se reducirá también la distancia media entre puertas, resultando así un menor retardo de propagación.

La alimentación de un computador de alto rendimiento puede constituir un desafío importante. En un computador de gran tamaño a temperatura ambiente, las tensiones de alimentación se miden en decenas de volt y las corrientes en miles de ampère. En un computador de unión Josephson, las tensiones de operación son más pequeñas (se reducen en un factor de 1000) y las corrientes caen en un factor de 10, de tal modo que sólo se precisa, como máximo, de una diezmilésima de la potencia. A pesar de lo cual, sigue siendo esencial controlar o confinar las perturbaciones en el sistema de distribución de potencia, pues, de no hacerlo, interrumpirían la operación de la máquina.

Las perturbaciones se producen por una variación súbita en la demanda de corriente cuando un aparato cambia de estado; una comparación familiar la tenemos en la atenuación de las luces de la casa cuando se conecta un motor eléctrico. Una solución a este problema es

proyectar los aparatos de conmutación de suerte que las demandas de potencia de los dos estados lógicos sean idénticas. Hoy por hoy resulta imposible fabricarlos exactamente iguales, pero no lo es conseguir que la relación de las dos demandas sea muy próxima a la unidad aumentando la disipación de potencia en la resistencia asociada con la propia fuente de alimentación. Por ejemplo, supongamos que un aparato consume un microwatt en el estado lógico 1 y dos microwatt en el estado lógico 0. En estas condiciones, la demanda cambiará en un 100 por cien al conmutar el aparato. Sin embargo, si la resistencia de alimentación disipa cinco microwatt, el cambio total en la demanda cambia de seis microwatt a siete, o el 17 por ciento. Aunque es difícil aplicar esta técnica a los circuitos a semiconductores en los que el consumo de potencia es ya alto, más fácil resulta conseguir que en la tecnología de la unión Josephson se disipe cinco veces más potencia en la resistencia de alimentación que en el propio aparato lógico.

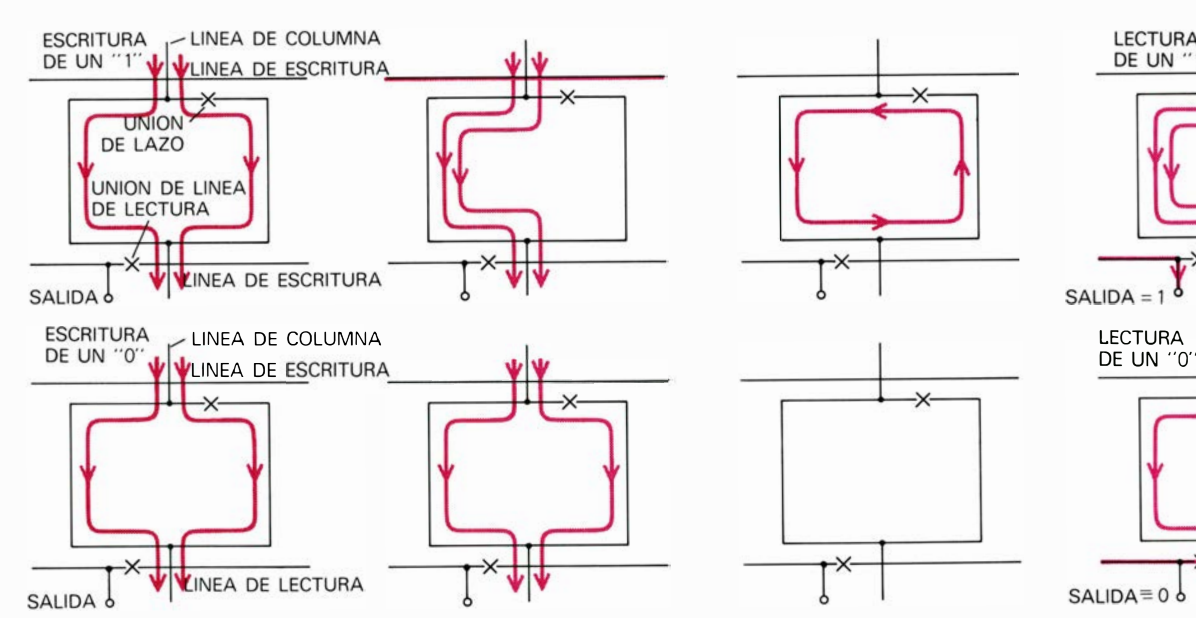
Incluso con semejante inconveniente en la fuente de alimentación, la regulación se hace todavía necesaria y es ventajoso colocar el regulador tan próximo como sea posible a la carga conmutada. Podemos usar como regulador una unión Josephson, con tal de que opere con una corriente mayor que la supercorriente máxima. Siempre que la tensión a través de este regulador exceda la tensión de intervalo, la corriente es derivada a tierra. Colocando muchos reguladores de ésos en todo el computador, se absorbe cualquier perturbación en la tensión de alimentación antes de que llegue a propagarse a través del sistema. En la práctica, cada regulador está formado por cuatro uniones conectadas en serie, de modo tal que el nivel de la tensión es estabilizado a cuatro veces la tensión de intervalo, o sea, unos 12 milivolt.

Debemos una descripción de un sistema completo de alimentación de potencia para un computador de unión Josephson a Frank F. Fang y Dennis J. Herrell, del Centro de Investigación Watson. Tal como indiqué anteriormente, conviene que la mayoría de los componentes del computador trabajen con corriente alterna. La fuente última de alimentación es un oscilador a temperatura ambiente que produce una corriente alterna de onda sinusoidal, análoga a la de la corriente de una casa normal pero a una frecuencia mucho más elevada. La corriente alterna sin regular se distribuye a través del computador por líneas de transmisión superconductoras. En cada pastilla, se reduce la tensión al nivel adecuado por un pequeño transformador, cuyos "arrollamientos" son películas delgadas de superconductor. Los reguladores de alimentación de la pastilla cortan los picos de la onda sinusoidal, dando a cada hemiciclo una forma trapezoidal.

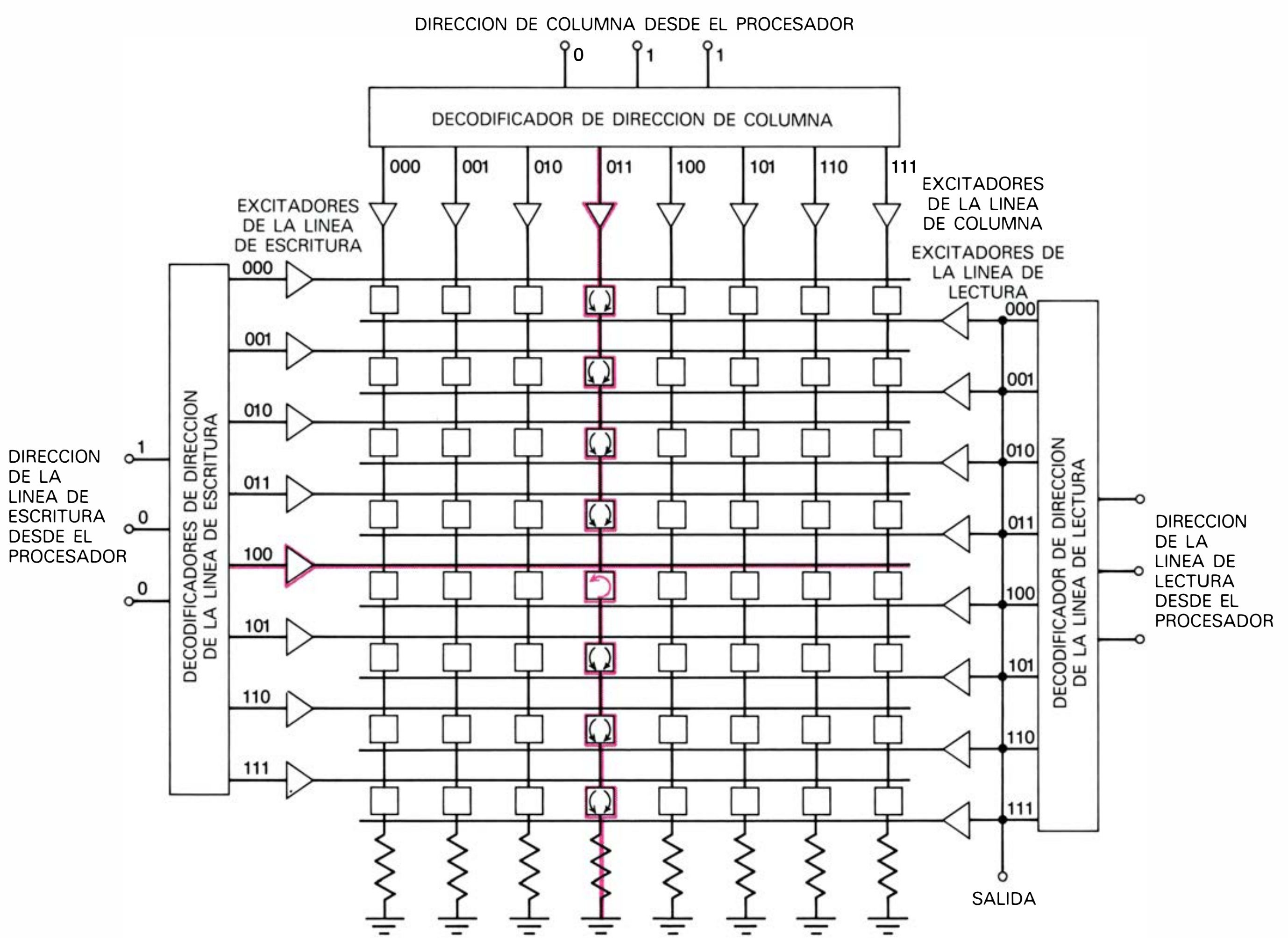
Este sistema, en el montaje de Fang y Herrell, no sólo alimenta el computador sino que también proporciona su reloj maestro. El objeto de un reloj en un computador es sincronizar todos los acontecimientos de tal modo que, por ejemplo, todas las entradas en una puerta lleguen simultáneamente. Puede producirse un problema serio, denominado viración o muerte del reloj, si la propia señal del reloj no alcanza todas las partes de la máquina al mismo tiempo. Para evitar la viración del reloj, las señales de potencia y de reloj en el computador de unión Josephson se distribuirán a través de un circuito parecido a un árbol en el cual todas las ramas tengan aproximadamente la misma longitud.

Si el tiempo del ciclo del computador es de un nanosegundo, cada ciclo completo de la tensión alterna de alimentación debe durar dos nanosegundos. De aquí que la frecuencia de alimentación sea de 500 megahertz.

Para que un computador opere a la velocidad máxima, se precisa que pueda recuperar los datos e instrucciones de la unidad de memoria dentro de un ciclo único del procesador, o como máximo dentro de unos pocos ciclos. Además, un computador muy rápido lógicamente podrá manejar tareas grandes y, por tanto, la memoria deberá ser también de gran tamaño, capaz de almacenar varias decenas de millones de bits de informa-



CELULA DE ALMACENAMIENTO para una memoria secundaria de alta velocidad. Consiste en un lazo superconductor con una unión Josephson en un brazo y con sistema para crear y detectar una corriente persistente en el lazo. Para almacenar un bit de información en la célula, se suministran simultáneamente corrientes al propio lazo (*línea de la columna*) y a la línea de "escritura" que está acoplada magnéticamente a la unión en el lazo. Si se aplica una señal a la línea de "escritura", la unión conmuta al estado resistivo desviando toda la corriente hacia el otro brazo del lazo. Cuando se desconectan ambas corrientes aplicadas, la unión obtiene de nuevo su superconductividad y así circula por el lazo una corriente persistente cuantificada, que representa un bit de información: el número binario 1. El escribir un binario 0 en la célula requiere la misma secuencia de acontecimientos, con la salvedad de que no se aplica ninguna corriente a la línea de escritura; resulta así que no queda establecida en el lazo ninguna corriente persistente. La presencia o ausencia de una corriente persistente puede detectarse aplicando simultáneamente corrientes a la línea de la columna y a la línea de "lectura". La línea de lectura incluye una unión dispuesta debajo de un brazo del lazo y controlada por la corriente en este brazo. Si hay corriente persistente en el lazo, la corriente de la línea de la columna va a un brazo del lazo y conmuta la unión de línea de lectura.



PASTILLA DE MEMORIA SECUNDARIA. Está organizada como una red cuadrada de células de almacenamiento. La pastilla completa debe tener 64 filas y 64 columnas para una capacidad total de 4.096 bits, pero aquí se ha esquematizado solamente un segmento de ocho por ocho. Cualquier célula puede ser seleccionada alimentando una columna y una línea de escritura o una línea de lectura. La memoria secundaria es la unidad más rápida en una jerarquía de memorias, aunque posee la capacidad más pequeña por pastilla. Las células de memoria principal son más simples.

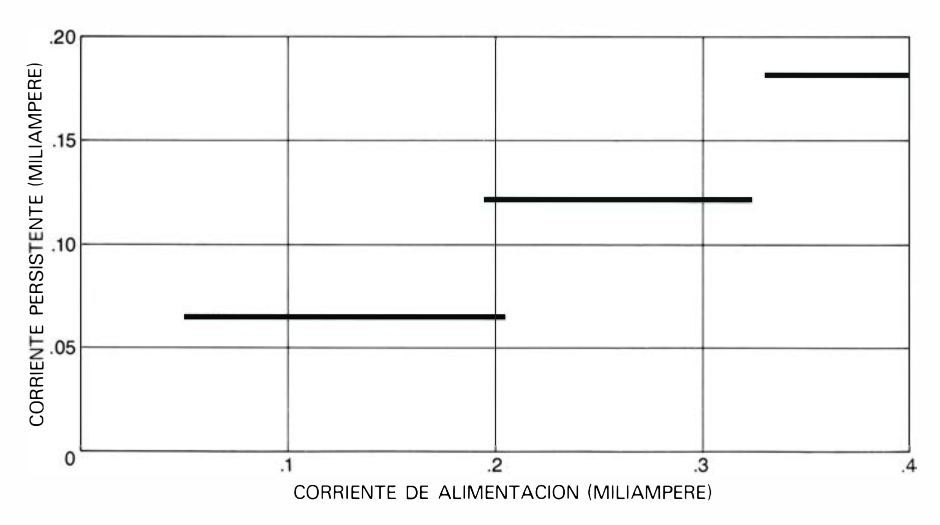
ción. Económicamente no es factible fabricar una memoria muy rápida de gran tamaño; ni quizá lo sea técnicamente. El compromiso que se ha alcanzado en los computadores de semiconductores es emplear una jerarquía de elementos de memoria. El procesador central está ligado estrechamente a una memoria secundaria que tiene una capacidad limitada, pero que es muy rápida; la memoria secundaria está complementada con una memoria principal con más capacidad, aunque mucho más lenta, la cual a su vez puede conducir a una unidad de almacenamiento masivo de memoria todavía mayor y más lenta; la memoria de masas es a menudo un disco o una cinta magnética. El funcionamiento eficiente de la jerarquía de memorias depende de los programas que lanzan la información adelante y atrás entre los subsistemas, de tal manera que los datos y las instrucciones que se precisan inmediatamente se encuentren casi siempre en la memoria secundaria.

Se empleará una jerarquía correspondiente de memorias en un computador de unión Josephson. Las células de almacenamiento de la memoria secundaria serán, en comparación, grandes y complejas (y por tanto más caras), pero la información podrá ser almacenada o recuperada de las mismas mucho más rápidamente que de cualquier otra memoria de computador que se haya fabricado hasta la fecha. En la memoria principal se sacrificará la velocidad para reducir el tamaño y el consumo de potencia de los elementos de la memoria, y ello permitirá colocar un número mayor de células sobre una pastilla. Los aparatos de almacenamiento de gran capacidad trabajarán a la temperatura ambiente, y es posible que sus principios básicos de diseño no difieran de los empleados hoy en día.

La naturaleza mecánico-cuántica de la superconductividad proporciona un mecanismo natural para el almacenamiento de la información digital. Si se establece una corriente en un lazo del superconductor, ésta genera un campo magnético que pasa a través del centro del lazo. La dirección del campo viene determinada por la dirección de la corriente. La magnitud del campo y la de la corriente están cuantificadas, es decir, pueden asumir sólo ciertos valores discretos, y si cambian, sólo lo hacen saltando desde un valor admisible hasta otro. Y todavía más, ambos, la corriente y el campo magnético, son persistentes: permanecen invariables incluso después de haber desconectado la tensión de excitación. En tales lazos, la información puede almacenarse asignando a un estado cuantificado el 1 binario y haciendo que otro estado diferente represente el 0.

Una célula de la memoria secundaria consiste en un lazo superconductor interrumpido por una unión Josephson. Sobre esta unión se dispone una línea de control (la línea de "escritura"), de modo que se acople magnéticamente. Además, se coloca una unión debajo de un brazo del lazo, controlada por la corriente en el lazo. El superconductor conectado a la segunda unión efectúa la "lectura".

Cuando una corriente pasa a través de un lazo superconductor se divide en dos flujos iguales, en la misma forma en que un río reparte su caudal alrededor



CORRIENTE PERSISTENTE en una célula de memoria. Dicha corriente está cuantificada; sólo puede tomar valores discretos. En la célula medida, la corriente almacenada más pequeña posible es de unos 0,06 miliampère y la siguiente corriente permitida es de unos 0,12 miliampère. Nunca se han observado corrientes intermedias entre estos valores. La magnitud del campo magnético está cuantificada. La cuantificación de la corriente reduce la ambigüedad en el almacenamiento de la información.

de una isla. Si, a continuación, se desconecta la corriente, no queda ningún flujo magnético atrapado dentro del lazo; el estado de flujo cero representa el 0 binario. Para almacenar el 1 en la célula de memoria, las corrientes deben alimentar simultáneamente al propio lazo y a la línea de escritura. La corriente en la línea de escritura fuerza la unión de un brazo del lazo a conmutar al estado resistivo, desviando por tanto toda la corriente del lazo hacia la otra rama. Cuando ambas corrientes se eliminan, la unión conmutada se reajusta automáticamente, cerrando el lazo, y queda establecida una corriente persistente. En los proyectos actuales, dos cuantos del flujo magnético almacenado corresponden al 1 binario.

Para leer el contenido de una célula de memoria se aplican simultáneamente corrientes al lazo de la célula y a la línea de lectura. Si no hay flujo almacenado, la corriente del lazo se divide nuevamente de modo simétrico y la unión en la línea de lectura permanece superconductora. Si el lazo mantiene los dos cuantos de flujo magnético que significan un 1, se conduce toda la corriente del lazo hacia un brazo del lazo el cual sirve también como línea de control para la unión de la línea de lectura. Como resultado, la unión de la línea de lectura conmuta, y aparece una señal en la salida. Hay que hacer notar que el almacenamiento de la información no depende de la alimentación de corriente a las células de memoria; las corrientes persistentes circularán a través de los lazos en tanto que la temperatura se mantenga por debajo del punto de transición a la superconductividad. Además, la lectura del contenido de una célula no borra la información que contiene.

Una pastilla de memoria secundaria contendrá una red cuadrada de células, de tal modo que cada célula podría localizarse en la intersección de una fila y de una columna. Los lazos estarán conectados en serie para formar las columnas; cada fila quedará definida por una línea de escritura y por una línea de lectura. Será necesario también incluir en la pastilla ciertos circuitos auxiliares, tales como los decodificadores que actuarán sobre la columna y la fila adecuadas cuando se les presente la dirección de una célula, y los excitadores que suministrarán las corrientes para las columnas y las filas. Si bien todavía no se han fabricado pastillas completas, los componentes individuales (las células, los excitadores y los decodificadores) han sido ya proyectados y ensayados. Una pastilla única de memoria secundaria soportará una red de 64 filas por 64 columnas dando una capacidad total de información de 4096 bits. La lectura de un bit tomará sólo unos 500 picosegundos y su escritura necesitará sólo el doble de tiempo, o un nanosegundo. La disipación de potencia será de unos seis miliwatt.

Las células de almacenamiento para la memoria principal son más simples, y por tanto, pueden empaquetarse conjuntamente a una densidad más alta: 16.384 (2^{14}) células cabrán dentro de una pastilla. El ahorro de tamaño se logra alternando la geometría del lazo superconductor y eliminando la línea de lectura y sus uniones asociadas. La célula de memoria es simplemente un interferómetro de dos uniones en el cual la presencia o ausencia de un cuanto único de flujo magnético constituye un bit de información binaria. Tal como ocurre en la memoria secundaria, las corrientes coincidentes a lo largo de una fila y de una columna se emplean para seleccionar una célula para la lectura o la escritura. Sin embargo, al leer, el aparato completo conmuta al estado resistivo cuando lee un 1, borrando la información; seguidamente se requiere otro ciclo de memoria para reescribir de nuevo la información original dentro de la célula. Se ha construido una sección de 2048 bits en una pastilla de memoria principal. Se espera que la pastilla a escala real tenga un tiempo de acceso para sacar la información de unos 15 nanosegundos y un consumo de potencia de unos 40 microwatt.

En un computador en funcionamiento la información se almacenaría y reclamaría no como bits únicos, sino como "palabras" de quizás 64 bits cada una. En la organización de la memoria propuesta aquí, serían accesibles en paralelo bloques de 64 pastillas. Una palabra se formaría conduciendo un bit único desde cada pastilla.

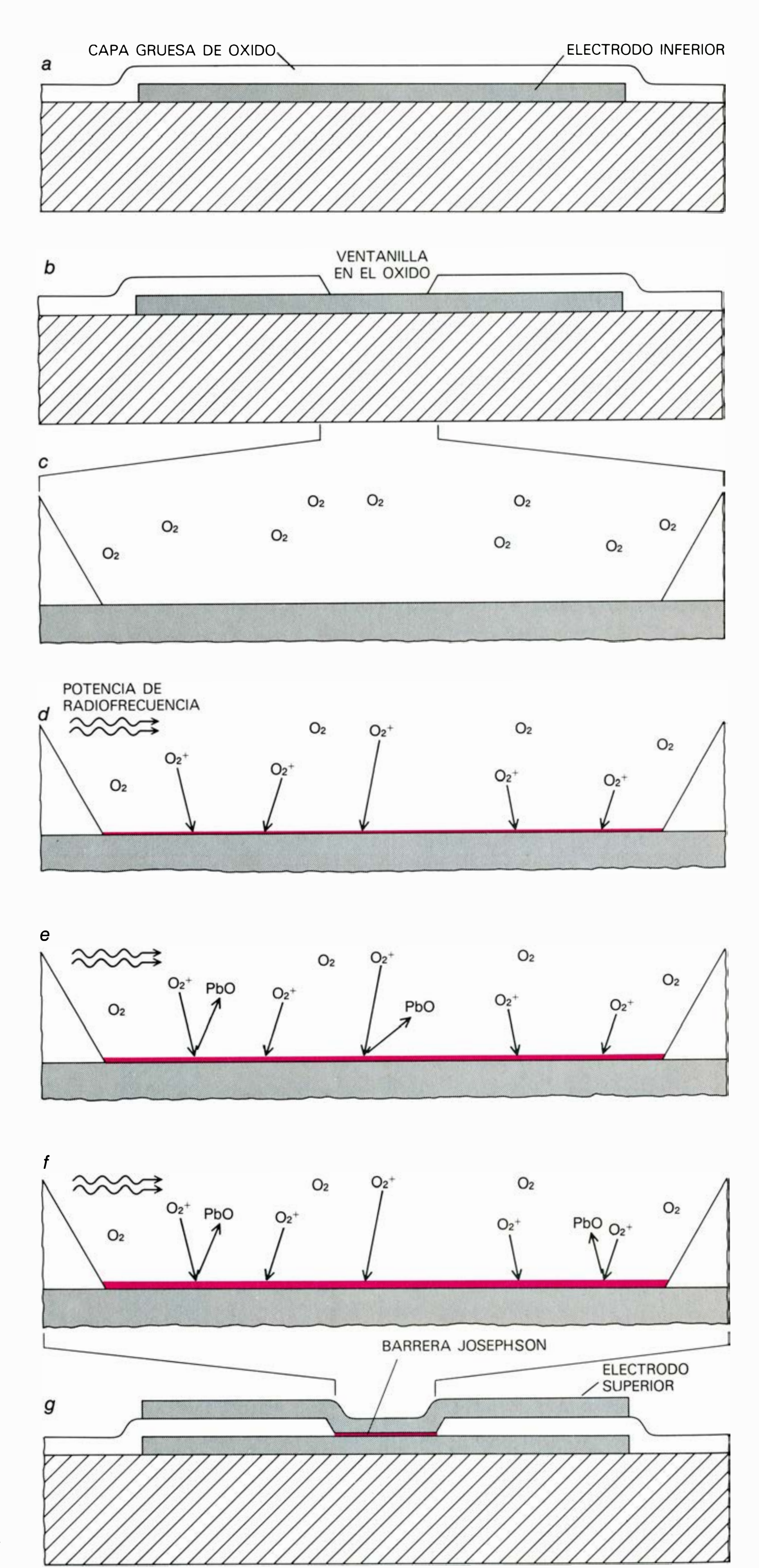
Un computador fabricado de uniones Josephson constituye un punto de partida radicalmente distinto de una tecnología de semiconductores bien establecida. Sin embargo, la fabricación de los componentes de la unión Josephson se apoya casi enteramente en métodos aprendidos durante el desarrollo de los aparatos de semiconductor. El material del sustrato escogido para las pastillas de la unión Josephson es el silicio, elegido no por sus propiedades de semiconducción sino por lo bien establecidas que están sus técnicas de fabricación de estructuras microscópicas precisas. Los diagramas del circuito se graban fotolitográficamente, tal como se realizan en los aparatos de semiconductores. En primer lugar, toda la superficie del silicio se recubre con una sustancia fotosensible denominada una reserva o capa protectora. La forma del circuito es definida por una máscara que deja expuestas a la luz algunas áreas de la reserva y que borra las otras; alternativamente, es posible trazar el diagrama con un haz electrónico dirigido. Después, las partes expuestas de la reserva se lavan y el metal queda depositado en las bandas expuestas. Pueden fabricarse a la vez varias docenas de pastillas sobre la superficie de una "oblea" serrada de un cristal único de silicio de gran tamaño.

La construcción de las pastillas de unión Josephson puede resultar más fácil que las de los componentes del semiconductor. El motivo es porque todos los elementos del aparato de la unión Josephson reposan directamente sobre la superficie de la pastilla, mientras que los semiconductores requieren la difu-

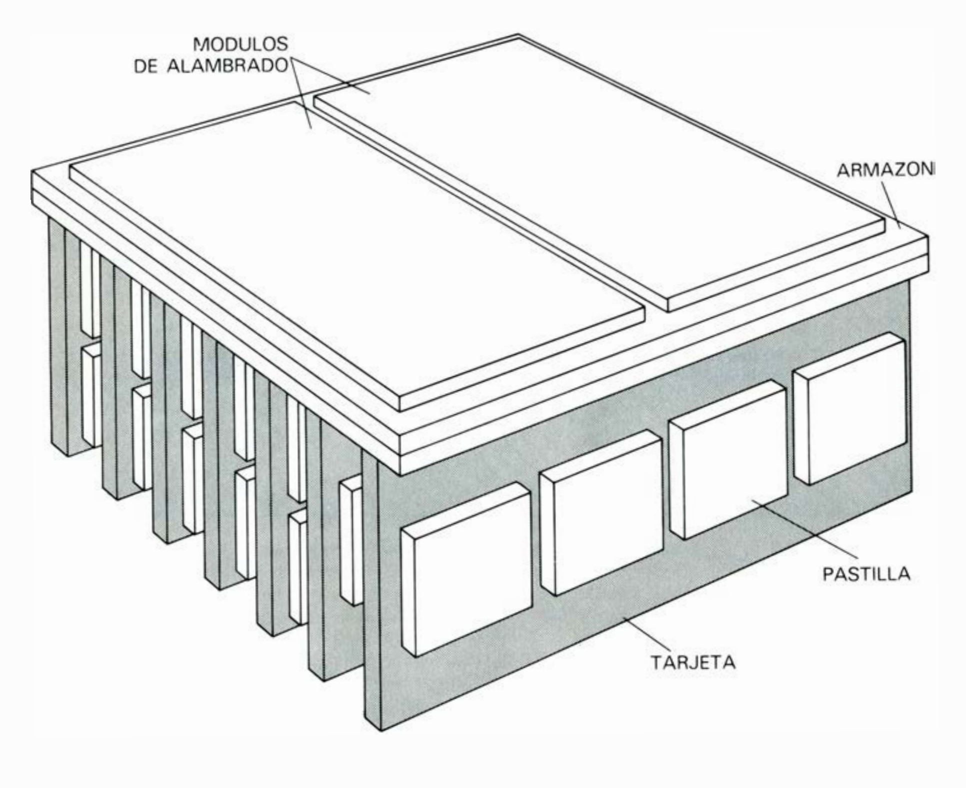
sión de las impurezas dentro del propio silicio. En la fabricación de una pastilla de unión Josephson, la primera etapa es de deposición de un plano de tierra superconductor de niobio que es cubierto con una capa aislante de óxido. A continuación, se depositan las trazas superconductoras inferiores. En el centro de Investigación Watson, mis colegas y yo fabricamos los superconductores a partir de una aleación de plomo, indio y oro. Generalmente, su tamaño varia entre 2,5 y cinco micrometros de ancho y unos 0,2 micrometros de espesor. En la parte superior de estos conductores se depositan capas adicionales de materiales aislantes y metálicos.

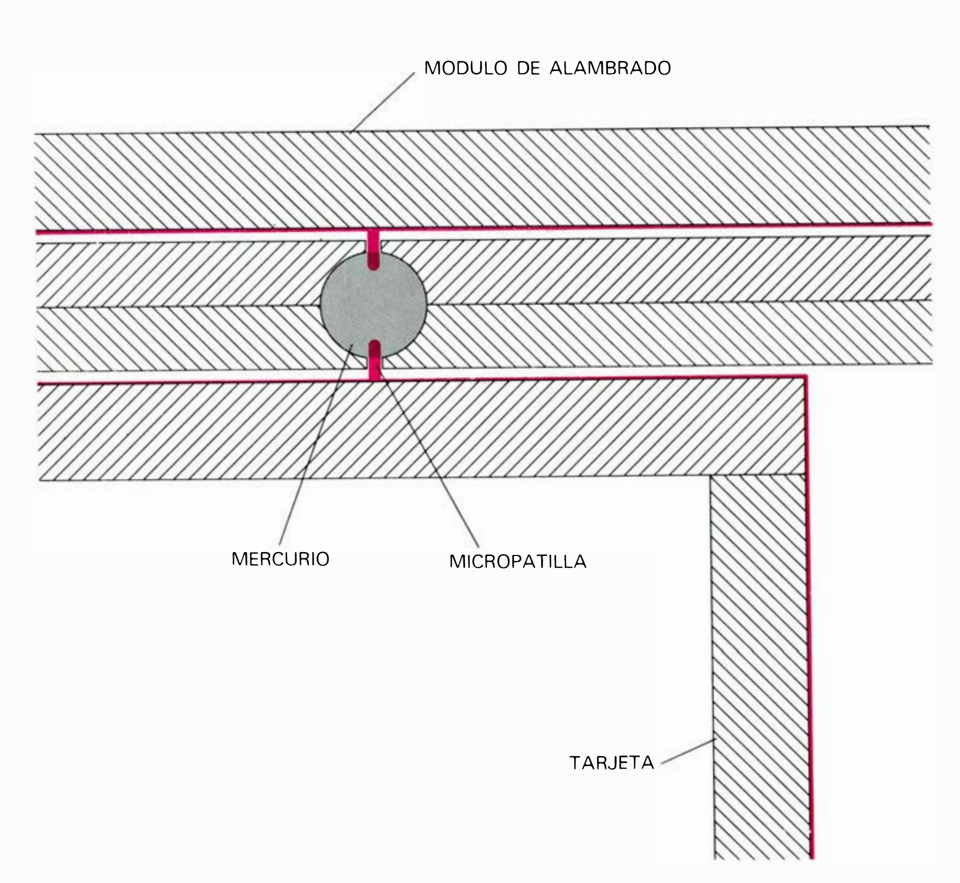
Sin duda, el paso más crítico en la fabricación es la formación de la delgada capa de óxido que sirve de barrera de unión. Como la probabilidad del efecto túnel es una función exponencial del espesor de la barrera, incluso una ligera variación en las dimensiones puede dar lugar a un gran cambio en las propiedades del aparato. El espesor óptimo suele hallarse en los 50 angstroms, o 0,005 micrometros. Además, para controlar el espesor de la capa importa también que no se extiendan "pelusillas" de metal a través de la capa de óxido, ya que crearían un cortocircuito en el superconductor.

En principio, debiera ser posible regular el espesor de la barrera túnel controlando el tiempo que el metal está expuesto al oxígeno, pero la contaminación inevitable de la superficie metálica conduce a variaciones impredecibles en el grado de oxidación. James H. Greiner, del Centro de Investigación Watson, ha ideado otro método para formar la barrera, que se ha demostrado muy



FABRICACION de la barrera túnel. Se trata del paso más difícil en la fabricación del aparato de unión Josephson. Un método ideado por James H. Greiner, del Centro de Investigación Watson, forma realmente una capa de óxido aislante de unas 50 unidades angstrom de espesor. El electrodo inferior de la unión se recubre primero con una capa gruesa de óxido (*a*), y luego se abre una ventanilla en el óxido para exponer una banda de metal desnudo (*b*). En una cámara que contenga oxígeno a baja presión (*c*), se monta el aparato en un electrodo de un sistema de descarga por radiofrecuencia. La descarga ioniza algo del oxígeno que limpia y oxida el metal (*d*). Aunque en un comienzo, la capa de óxido se produce rápidamente, su velocidad de formación va disminuyendo a medida que el recubrimiento de óxido aumenta de grosor. Y todavía más, se inicia otro proceso que compite con el de la oxidación; algunos iones de oxígeno no se unen al metal, sino que sueltan alguna molécula del óxido ya existente (*c*). El grado de oxidación y el régimen de eliminación del óxido terminan por igualarse (*f*); en adelante el espesor de la barrera permanecerá constante. El espesor para el cual se logra el equilibrio viene determinado por la presión del oxígeno por la energía del campo de radiofrecuencia y por la temperatura. Consumada la barrera, se deposita sobre la misma un segundo electrodo (*g*).





EMPAQUETADO DE ALTA DENSIDAD de un computador de unión Josephson, esencial para minimizar la longitud de los pasos de señal entre los circuitos. Las pastillas que contienen todos los componentes activos se unen en posición invertida a "tarjetas" portadoras que se fabrican de silicio. Las conexiones se realizan directamente desde la superficie de la pastilla hasta las líneas de transmisión superconductoras incorporadas en la tarjeta. Se conectan varias tarjetas en un mismo tablero o armazón y se efectúan las conexiones entre las tarjetas mediante módulos de alambrado que se enchufan al otro lado del tablero. Los contactos eléctricos entre las tarjetas y los módulos de alambrado se consiguen mediante uniones de "soldadura" en las cuales una gota de mercurio hace de puente que cubre el intervalo entre dos micropatillas de platino de unos 75 micrometros de diámetro; cuando el computador está sumergido en helio líquido el mercurio pasa a estado sólido. Para un computador con un tiempo de ciclo de un nanosegundo el conjunto tendría alrededor de 2,5 centímetros de lado aproximadamente.

seguro. La base, o parte inferior del electrodo de la unión, recibe primero una capa gruesa de óxido sobre la cual se abre una ventana donde debe formarse la unión exponiéndose así nuevamente el metal desnudo. La oblea se monta a continuación en una cámara al vacío, donde se introduce oxígeno a baja presión el cual es ionizado por una descarga de radiofrecuencia. Como la oblea constituye un electrodo del circuito de radiofrecuencia, los iones de oxígeno chocan a alta velocidad contra la superficie metálica y tienen inicialmente una alta probabilidad de combinarse con el metal para formar un óxido. Sin embargo, a medida que aumenta el espesor de la película de óxido, disminuye su grado de formación. Además, en esta etapa empieza a cobrar importancia un proceso competitivo del anterior: cuando una molécula choca contra una capa gruesa, es muy posible que no se añada el recubrimiento de óxido sino que más bien tenga tendencia a soltar una molécula del óxido existente. Al final, se llega a un equilibrio entre el grado de oxidación y el grado con que es eliminado el óxido permaneciendo ya fijo el espesor de la barrera. Este espesor no viene dado por la duración del proceso, sino por la presión del oxígeno, por la potencia de radiofrecuencia y por la temperatura. Se controla fácilmente.

Al objeto de minimizar la longitud de los pasos de señal en un computador de unión Josephson es necesario que el conjunto de pastillas, que incorporan todos los componentes activos, se monte con sumo cuidado. En un computador de semiconductor cada pastilla suele ir encapsulada en su propio paquete de plástico o de cerámica y soldada a un gran tablero del circuito impreso con muchas otras pastillas empaquetadas por separado. Esta clase de montaje es demasiado pródiga en espacio para una máquina superconductora de alta velocidad.

El proyecto de empaquetado óptimo envolvería todas las pastillas en el volumen más pequeño posible y proporcionaría conexiones directas, punto por punto, entre las mismas. Esto no es práctico debido a la complejidad de las interconexiones, pero ya se ha proyectado un sistema de empaquetado que consigue claramente una alta densidad de los circuitos. Fue introducido por Wilhelm Amacker, del Centro de Investigación Watson.

El proyecto exige la unión de las pastillas sin encapsular y en posición invertida a una "tarjeta" portadora de unos 2,5 centímetros de lado. Varios cientos de pequeñas bolitas de soldadura conec-

tan los discos de contacto de la pastilla con los correspondientes discos de la tarjeta. Las pastillas se empaquetan conjuntamente disponiéndose tan próximas como sea posible a ambos lados de la tarjeta. La disipación de potencia no limita la densidad de las pastillas, tal como ocurre en un computador de semiconductores. El calor generado puede eliminarse directamente hacia el helio líquido; no se exige el uso de disipadores térmicos. Las interconexiones entre las pastillas de la tarjeta son proporcionadas por dos capas de hilos conductores depositadas en la tarjeta. Los hilos toman la forma de líneas de transmisión superconductoras.

La propia tarjeta y muchas otras partes del conjunto se fabricarán de silicio, igual que las pastillas. La adopción de un material único reduce las tensiones térmicas cuando el computador se refrigera desde la temperatura ambiente hasta la temperatura del helio líquido. Varias tarjetas, separadas una décima de pulgada, se insertan dentro de un tablero o armazón; las interconexiones entre las tarjetas se realizan mediante un módulo de alambrado amovible que se enchufa en la parte posterior del tablero. Esta característica de desmontaje de las tarjetas o de los módulos de alambrado facilitará las reparaciones o las modificaciones.

Quizá la característica más sobresaliente de este sistema de empaquetado sea el método para establecer conexiones eléctricas seguras en el punto donde las tarjetas y los módulos de alambrado se encajan en el tablero. El contacto se realiza a través de micropatillas de platino de unos 75 micrometros de diámetro. Estas se enchufan dentro de pequeños huecos en el tablero que se rellenan con mercurio. A la temperatura ambiente el mercurio es líquido y de este modo las tarjetas y los módulos pueden ser insertados o desmontados con rapidez; sin embargo, a 4.2 grados Kelvin el mercurio es un sólido. Por consiguiente, se consigue una clase especial de soldadura tal que su punto de fusión es inferior a la temperatura ambiente.

La necesidad de una alimentación continua de helio líquido para refrigerar el computador de unión Josephson no es tan grave como parece a primera vista. En realidad, el coste de un refrigerador de helio es comparable al coste conjunto de la fuente de alimentación más grande y del sistema de refrigeración que se requieren en un computador de semiconductores. Es cierto que el licuefactor de helio achica las dimensiones del computador propiamente dicho, pero el licuefactor no es mayor que un refrigerador doméstico. Es suficiente una capacidad de refrigeración de unos 10 watt.

Los componentes descritos aquí –circuitos lógicos con un retardador de puerta única de 35 picosegundos, una memoria secundaria con un tiempo de acceso de 500 picosegundos y una memoria principal con un tiempo de acceso de quizá 10 nanosegundos– no pueden ser montados para fabricar un computador de alto rendimiento que tenga un tiempo de ciclo de un nanosegundo. En lugar de ello, el tiempo de ciclo mínimo se estima en unos tres nanosegundos. Lo que, obviamente, resulta muy rápido: puede preverse que tal computador ejecute del orden de 100 millones de instrucciones por segundo. Además, la tecnología de la unión Josephson es joven: existen motivos fundados para creer que más adelante se lograrán tiempos de ciclo inferiores al nanosegundo.

No es descabellado preguntar por el motivo por el cual se necesitará un computador que sea 50 veces más rápido que los computadores más veloces que se fabrican hoy. Hay algunas tareas de cálculo en las que la velocidad constituye en sí misma un factor importante. Un ejemplo perpetuo es la predicción del tiempo a largo plazo, que en la actualidad viene limitada por el tiempo requerido para seguir las variaciones en un computador que es un modelo de la atmósfera. (De aquí que una predicción del tiempo de cinco días es de escaso valor si toma 10 días para formularla.) En algunos otros campos, tales como la criptología, existe también una gran de manda de los recursos del computador probablemente podrán beneficiarse rectamente de la alta velocidad de operación del mismo.

Nadie niega que estas explicaciones sean muy peculiares. Pero si ellas fueran sólo las únicas que se contemplaran, la elevada inversión de capital necesaria para desarrollar una nueva tecnología electrónica apenas sería de interés. Los usos principales del computador de unión Josephson serán probablemente más mundanos. Se utilizarán en el procesamiento rutinario de seguros, en la devolución de impuestos y en las nóminas. Servirán a un sinfín de usuarios y realizarán múltiples funciones en los departamentos centrales de cálculo de las universidades. En la mayoría de tales aplicaciones no existe ninguna diferencia en completar una tarea que toma un millón de ciclos de máquina en un milisegundo o en cincuenta milisegundos. El punto a señalar es que un computador que trabaje 50 veces más rápido puede hacer un trabajo 50 veces mayor y quizá por el mismo coste.

La gravedad en la teoría cuántica

Un experimento con un interferómetro de neutrones, instrumento en el que las ondas de neutrones se interfieren, ha demostrado que las leyes de la teoría cuántica son válidas en presencia de campos gravitatorios

Daniel M. Greenberger y Albert W. Overhauser

La mecánica cuántica y la teoría general de la relatividad (la teoría moderna de la gravitación) constituyen los productos finales de las revoluciones que afectaron al modo como los físicos interpretaban el mundo. Hasta hace poco no se había producido ninguna conexión experimental entre estas dos teorías fundamentales. Las propiedades ondulatorias que la mecánica cuántica atribuye a las partículas subatómicas se muestran normalmente evidentes en torno a la escala atómica de 10^{-8} centímetros, en tanto que los efectos gravitatorios sólo llegan a ser apreciables a escala estelar o cósmica.

La situación ha cambiado con el desarrollo del interferómetro de neutrones, instrumento que permite la mutua interferencia de las ondas de neutrones, a lo largo de una distancia de varios centímetros. El interferómetro de neutrones constituye, en efecto, un amplificador enormemente poderoso que combina sucesos microscópicos de suerte que puedan seguirse y supervisarse a escala macroscópica. Así, ha permitido medir el efecto gravitatorio de la Tierra sobre la fase de la onda de un neutrón, efecto que durante mucho tiempo se consideró demasiado débil para someterlo a medición. Aunque los experimentos con el interferómetro de neutrones no pueden indagar, de una manera pormenorizada, en la teoría de la gravitación, ofrecen una vigorosa aproximación a la interpretación mecánico-cuántica del principio de equivalencia, piedra angular de la relatividad general. Este principio afirma que el resultado de estar en reposo en un campo gravitatorio es equivalente al de estar en reposo en un sistema de referencia acelerado.

Las ondas de neutrones se interfieren de igual forma que lo hacen las ondas en un estanque o las luminosas. Cuando dos trenes de ondas de igual amplitud se encuentran, simplemente se superponen. Cuando las ondas están exactamente en fase (las crestas coinciden con las crestas y los valles con los valles), hay interferencia constructiva y, por tanto, la amplitud resultante es dos veces mayor; cuando están desfasadas exactamente (las crestas coinciden con los valles), la interferencia es destructiva y se cancelan, por tanto.

Si las ondas de superficie (las ondas de un estanque de agua) se propagan a partir de dos rendijas alineadas y próximas entre sí, se superpondrán y originarán una figura de interferencia. Los puntos de interferencia constructiva en esa figura se dispondrán a lo largo de líneas que formarán ángulos característicos con la línea de las rendijas. Lo mismo vale decir para los puntos de interferencia destructiva. Estos ángulos característicos dependen del cociente entre la longitud de onda y la separación entre las rendijas. Cuando la longitud de onda y la separación entre las rendijas son aproximadamente del mismo orden de magnitud, los ángulos de interferencia constructiva son notables. Cuando la longitud de onda es mucho menor que la separación entre las rendijas, los ángulos de interferencia constructiva resultan tan pequeños que no podemos detectar la figura.

Si hay más de dos rendijas equidistantes, los ángulos de interferencia constructiva son los mismos que para el caso de las dos rendijas. Cuantas más rendijas haya en la superficie, sin embargo, tanto más nítidos quedarán definidos los ángulos. Hágase el lector la siguiente composición. Supóngase que las ondas procedentes de dos rendijas adyacentes están ligeramente desfasadas cuando alcanzan un cierto punto distante de ellas, es decir, las crestas no llegan a un solapamiento completo. Por consiguiente, en ese punto, la onda proveniente de la rendija más próxima está desfasada el doble de lo anterior, la onda desde la siguiente rendija está desfasada el triple, y así sucesivamente. De ello resulta que las ondas procedentes de muchas rendijas crearán un caos absoluto, cuyo producto será una cancelación total. Para una superficie con muchas rendijas los únicos puntos distantes en los que poder detectar una onda son aquellos para los que las ondas de las diferentes rendijas se suman exactamente, es decir, en los puntos situados a lo largo de los ángulos precisos de interferencia constructiva.

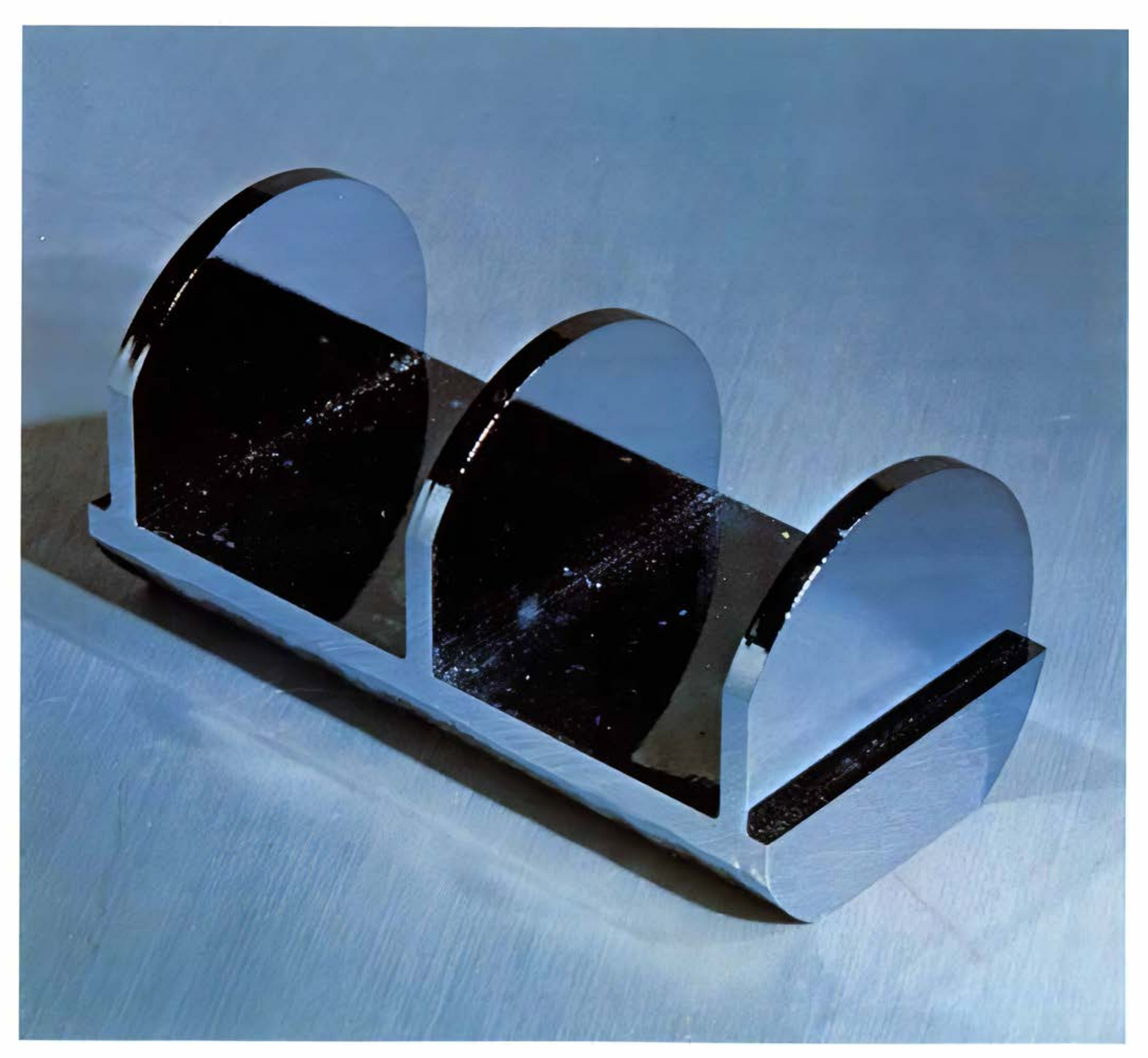
Para los rayos X, ondas electromagnéticas de alta energía con una longitud de onda típica de 10^{-8} centímetros, el medio ideal de dispersión es el de un cristal, para el que la separación entre los átomos es también del orden de 10^{-8} centímetros. Los rayos X no son dispersados por rendijas, sino por átomos en los planos de átomos que constituyen el cristal. Como hay 10^{8} átomos por centímetro, el ángulo de reflexión (ángulo de Bragg) está definido con gran precisión: aproximadamente 10^{-7} grados. El rayo reflejado puede hacerse monocromático (es decir, de una longitud de onda muy bien determinada), porque sólo esta longitud de onda se dispersará con un ángulo apropiado. De aquí que los rayos X hayan sido capaces de contribuir grandemente al conocimiento de la estructura atómica de los cristales: pueden descifrarse las nítidas figuras de dispersión para revelar la disposición geométrica de los átomos.

Al igual que otras partículas subatómicas, los neutrones presentan características de partículas y ondas. La interpretación ondulatoria, que los hechos experimentales impusieron a los físicos, encontró resistencia en un comienzo. Sin embargo, la teoría cuántica rinde un espléndido servicio, y en no pocos casos resulta más fácil desarrollar una sensibilidad intuititiva para el comportamiento de los sistemas mecánico-cuánticos que hacerlo para sus análogos clásicos. Pueden llevarse a cabo experimentos mecánico-cuánticos análogos al de las dos rendijas con ondas en el agua; experimentos que postulan una interpretación ondulatoria para las partículas subatómicas.

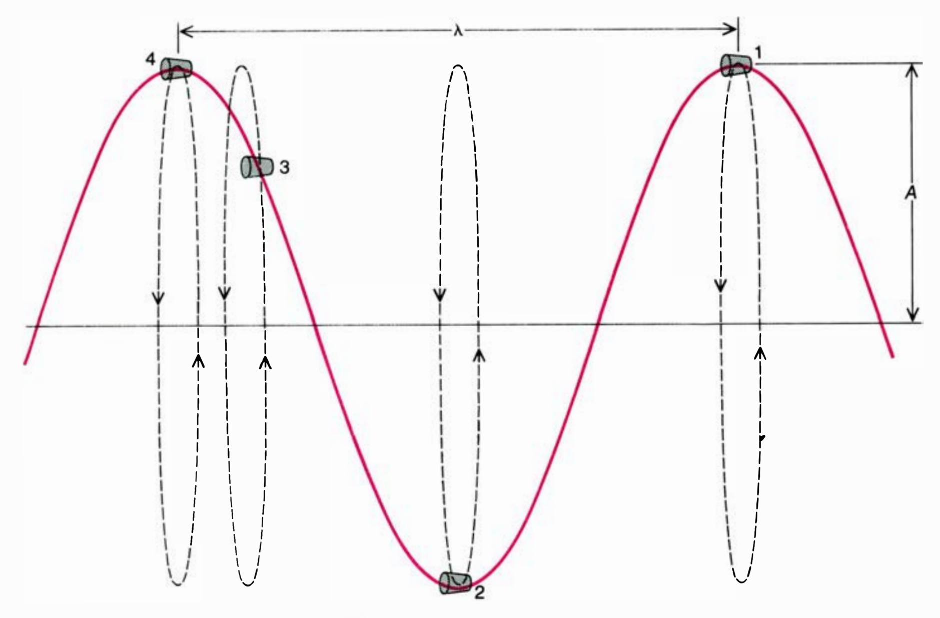
Como los rayos X, los neutrones de longitudes de onda apropiadas son dispersados también por cristales. Tal dispersión es la base del interferómetro de neutrones. En 1964, Ulrich Bonse y Michael Hart desarrollaron un interferómetro de rayos X en la Universidad de Cornell. Se pensó entonces equivocadamente que el aparato no serviría para el caso de los neutrones, razón por la que el primer interferómetro de neutrones hubo de esperar su puesta en funcionamiento hasta 1974, de la que se ocuparon Bonse, Helmut Rauch y W. Triemer, del Instituto Nuclear Austríaco de Viena. El cristal, de silicio, ha de ser esencialmente perfecto: un cristal único de hasta 10 centímetros de longitud, absolutamente libre de dislocaciones y otros defectos en su estructura regular atómica. En una construcción de interferómetro típica, se talla un cristal cilíndrico de unos ocho centímetros de longitud y cinco centímetros de diámetro hasta dejar tres "orejas" o planchas, semicirculares, conectadas al resto del cilindro. Las orejas, que miden un espesor de alrededor de medio centímetro, distan una de otra unos tres centímetros.

El haz típico de neutrones que entra en el interferómetro tiene aproximadamente un centímetro de ancho. Puesto que la longitud de onda de los neutrones es de sólo 10^{-8} centímetros, el haz se propaga entre las orejas a lo largo de una línea que podríamos considerar recta, como lo haría un rayo de luz. Los neutrones con esa longitud de onda son neutrones térmicos: poseen aproximadamente la misma energía cinética que tendrían en un movimiento aleatorio a la temperatura ambiente.

La onda de un neutrón, como cualquier otra onda, tiene una amplitud y una fase, que pueden ser descritas por una función de onda ψ. La interpretación física de la función de onda se basa en que el cuadrado de la amplitud en cualquier punto del espacio determina la probabilidad de encontrar el neutrón en ese punto. Si un experimento se repitiese muchas veces, un detector de neutrones en ese punto registraría un número de



INTERFEROMETRO DE NEUTRONES TIPICO. Consiste en un perfecto cristal único de silicio de unos ocho centímetros de longitud por cinco centímetros de diámetro. El cristal se ha cortado cuidadosamente mediante instrumentos con punta de diamante ópticamente controlados para dejar tres "orejas", o proyecciones, conectadas por la parte inferior del cristal. Cada oreja tiene un espesor de medio centímetro, Al haberse tallado las orejas a partir de un cristal único, los átomos se hallan alineados en ellas con precisión. El interferómetro está en el laboratorio de Clifford G. Shull.



SERIE DE CORCHOS flotando sobre una ola en el agua. El fenómeno demuestra las propiedades del movimiento ondulatorio. Cuando una onda que viaja hacia la derecha pasa por un corcho del agua, el corcho oscila arriba y abajo periódicamente, con un movimiento limitado horizontalmente. La amplitud de la onda (*A*) es el máximo desplazamiento del corcho desde su posición de equilibrio. Se considera que los corchos 1 y 4, que están separados por una distancia λ igual a la longitud de onda, se hallan en fase porque sus movimientos son idénticos. Se dice que los corchos 1 y 2, separados por una distancia λ/2, se hallan en fases opuestas porque sus movimientos son exactamente opuestos. El movimiento del corcho 3 se rezaga con respecto al movimiento del 4: estos dos corchos sufren un ligero desfase.

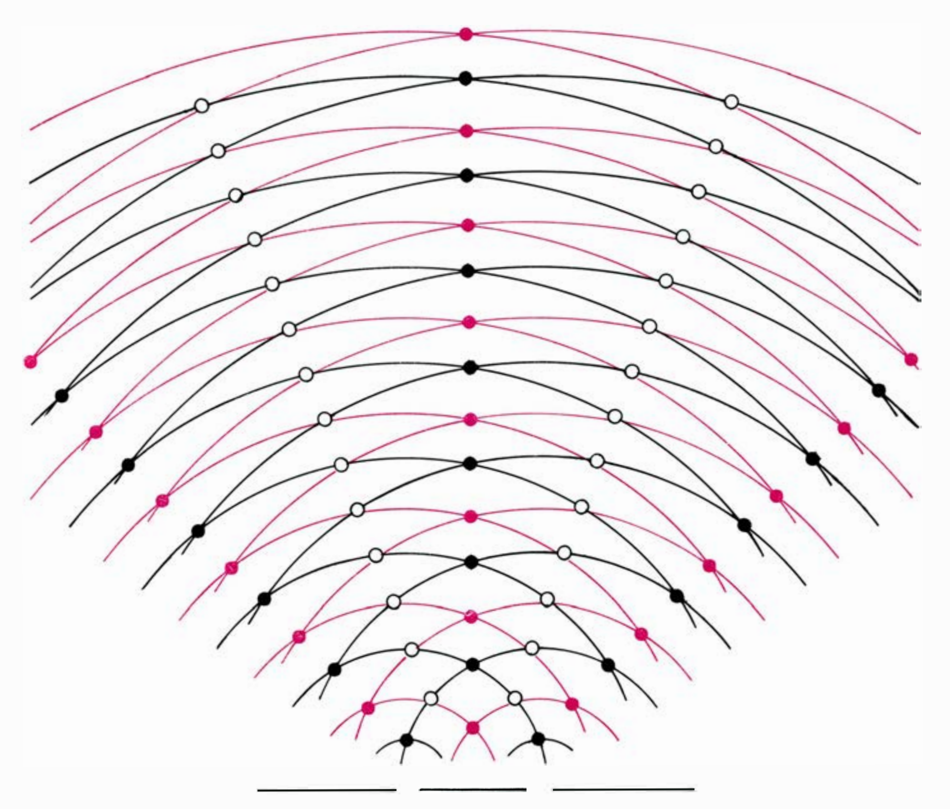


FIGURA DE INTERFERENCIA DE DOS ONDAS de igual amplitud que se propagan circularmente. Tiene puntos de intensidad máxima, en los puntos sólidos, llamados antinodos, y puntos de intensidad nula, en los círculos, llamados nodos. Las líneas de colores representan los valles y las líneas negras las crestas de la onda. Allí donde las ondas se encuentran, interfieren o se superponen. En los antinodos las ondas están en fase, lo que significa que las crestas coinciden con las crestas y los valles con los valles (interferencia constructiva) y en los nodos las ondas están desfasadas, es decir, las crestas coinciden con los valles (interferencia destructiva). Los puntos de interferencia constructiva caen a lo largo de las líneas que forman un ángulo característico con la línea que conecta las rendijas. Los ángulos están determinados por el cociente entre la longitud de onda y la separación entre las rendijas. En el espacio de tres dimensiones, las ondas tienden a propagarse esféricamente. Sobre una superficie plana como la mostrada aquí, las ondas se propagan circularmente. Las ondas se generaron al dirigir una sola onda a dos rendijas estrechas. Cada rendija actúa de fuente puntual de una onda circular.

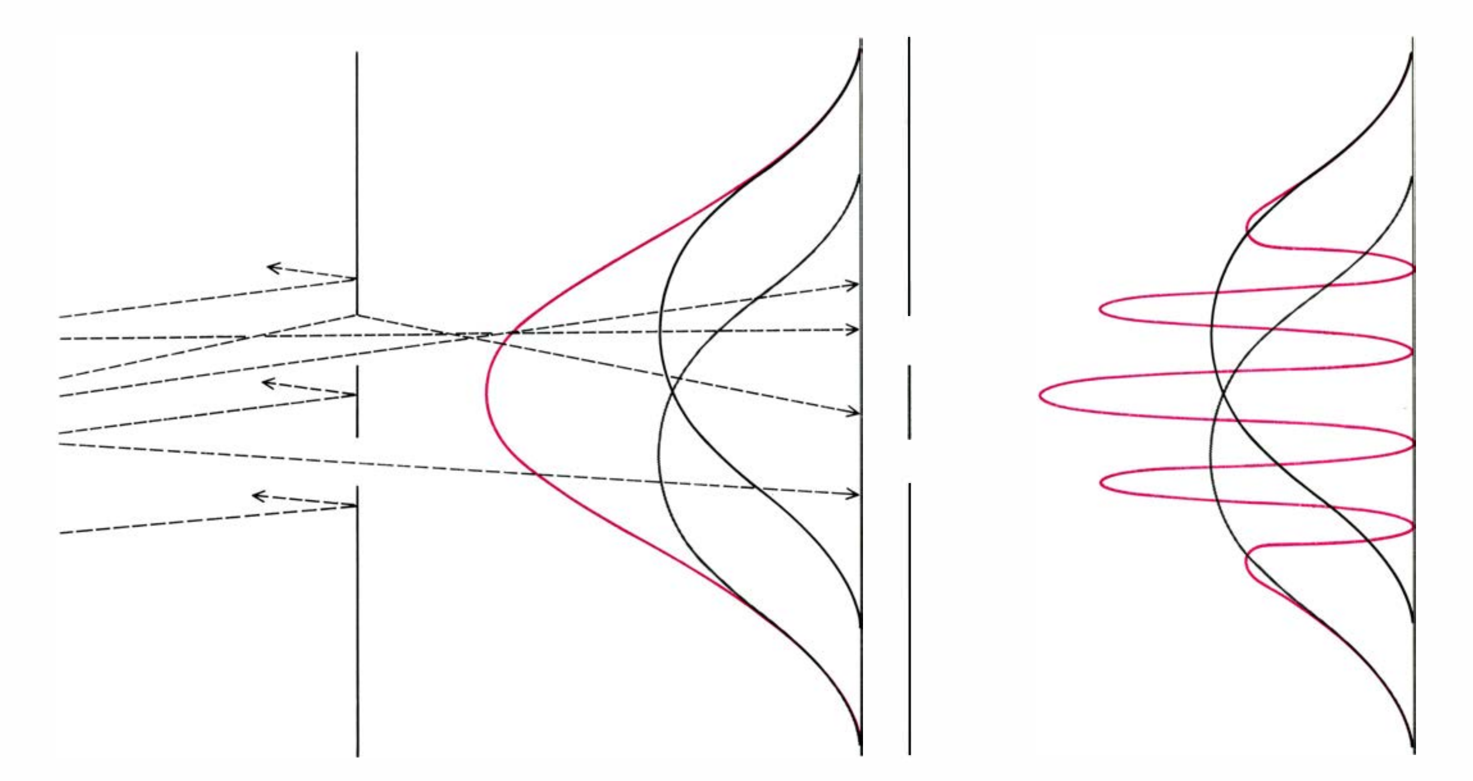
neutrones proporcional al cuadrado de la amplitud de la función de onda en dicho punto.

La propagación de la onda viene descrita por la ecuación de Schrödinger, que en el dominio de la mecánica cuántica reemplaza las leyes clásicas del movimiento de Newton. La longitud de onda de una partícula, el neutrón por ejemplo, es igual a h/p, donde h es la constante de Planck ($6{,}625 \times 10^{-27}$ erg por segundo) y p es el momento de la partícula (masa por velocidad). Por ejemplo, en un interferómetro de neutrones un neutrón con una longitud de onda de 10^{-8} centímetros tiene una velocidad de 10^{5} centímetros por segundo aproximadamente, alrededor de 10^{-5} veces la velocidad de la luz.

Cuando un haz de neutrones incide en la primera oreja del interferómetro, formando un ángulo de Bragg de, pongamos por caso, 20 o 30 grados, es dispersado por los planos de átomos perpendiculares a la cara del cristal. Esta clase de dispersión, que se conoce por dispersión de Laue, origina dos haces: uno transmitido formando un ángulo de Bragg θ con los planos de dispersión, y otro difractado, con el mismo ángulo pero en el lado opuesto, a partir de los planos de dispersión. En otras palabras, los haces que emergen forman una *V* cuyo vértice se encuentra detrás de la primera oreja. En la segunda oreja, esos haces vuelven a sufrir cada uno una dispersión Laue; los cuatro haces que emergen forman una *W* cuyos vértices están detrás de esta oreja. Y en la tercera oreja los dos haces difractados presentan una nueva dispersión Laue, encaminándose hacia los dos detectores que controlan la diferencia de fase entre los haces.

Como el interferómetro se construyó a partir de un solo cristal, los átomos de la tercera oreja estarán alineados exactamente con los átomos de la primera y la segunda. Ello significa que el interferómetro es un sistema macroscópico con una ordenación microscópica intrínseca dentro de los 10^{-8} centímetros. Si hubiera dislocaciones u otras imperfecciones en el cristal, los átomos de las tres orejas no estarían alineados, lo que destruiría la coherencia de los haces de neutrones. Por otra parte, si las orejas no fuesen talladas de un cristal único, sino que estuviesen separadas físicamente unas de otras, resultaría imposible alinearlas con precisión.

Importa advertir que los haces de neutrones del interferómetro no son dispersados por las superficies de las orejas, sino por los planos de átomos en ellas. Cuando un neutrón penetra en el cristal desde el aire, su velocidad permanece



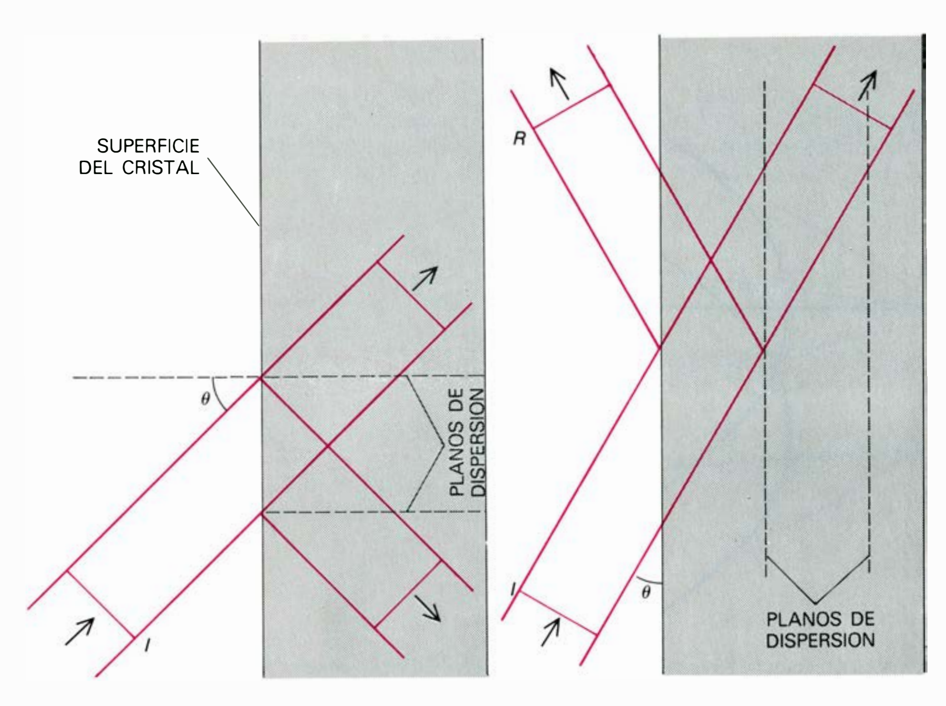
EXPERIMENTO TRADICIONAL de dos rendijas. Ese montaje muestra la diferencia entre el comportamiento clásico de una partícula macroscópica y el comportamiento mecánico-cuántico de una partícula subatómica como el neutrón. En el experimento de la izquierda un haz de partículas macroscópicas, es decir, bien colimado, se dirige a través de las dos rendijas hacia la pantalla. La curva negra representa la distribución de las partículas en el blanco, cuando sólo una rendija está abierta. La curva gris simboliza la distribución cuando sólo la segunda rendija está abierta. La curva en color señala la distribución cuando ambas rendijas se hallan abiertas. La curva de color es la suma de las curvas negra y gris, porque cuando ambas rendijas están abiertas, cada partícula pasa a través de una de ellas. Si el experimento no se realiza con partículas macroscópicas, sino con neutrones (*derecha*), la distribución cuando ambas rendijas están abiertas (*en color*) se asemeja a una figura de interferencia típica de dos rendijas. En este caso no se puede decir que el neutrón pasó por una rendija u otra, como lo haría una partícula clásica. Existen ciertos puntos en la pantalla en los que inciden muchas partículas y otros donde no incide ninguna. Esto significa que los efectos de las dos rendijas pueden superponerse constructiva o destructivamente. Tanto la fase como la amplitud de onda que emerge de cada rendija son importantes. Sin embargo, cada neutrón exhibe también propiedades de partícula: incide en un punto de la pantalla. La onda del neutrón determina la probabilidad de que el neutrón incida en un punto particular de la pantalla. La probabilidad es proporcional al cuadrado de la amplitud de la función de onda del neutrón. La figura de interferencia se reduce a la figura clásica en el límite en que la longitud de onda es mucho menor que la rendija. Costó aceptar la interpretación ondulatoria de las partículas.

constante en una parte en 10^6; por tanto, variaciones mínimas en el espesor de una oreja sólo afectarían ligeramente a la coherencia del haz de neutrones. Consecuencia de ello es que las orejas admiten una imprecisión de unas pocas longitudes de onda. En cualquier caso, esa precisión sería tecnológicamente imposible. A modo de contraste, la luz visible se desplaza unas dos veces más de prisa en el aire que en una lente. Lo que supone que una pequeña irregularidad en la lente de sólo unas pocas longitudes de onda alteraría de una manera significativa la velocidad de la onda luminosa y, por ende, alteraría su fase de un modo impredecible. Afortunadamente, la longitud de onda de la luz visible es mucho mayor que la longitud de onda de un neutrón térmico; razón que permite construir lentes de alta calidad a pesar de que tengan imperfecciones de varias longitudes de onda en su espesor.

El límite sobre la coherencia de un haz de neutrones no se fija por la uniformidad del espesor de las orejas, sino por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Este principio, que pone un límite intrínseco sobre la precisión de cualquier fenómeno ondulatorio, determina la longitud para la cual las ondas de neutrones son coherentes. De acuerdo con el principio de incertidumbre, cuanto más nítidamente esté definida la longitud de onda del haz tanto más se extenderá éste en el espacio. Puesto que sólo están permitidas, en el cristal, aquellas longitudes muy próximas a la longitud de onda que corresponde a una perfecta dispersión de Bragg, aquél define hasta dónde se propaga el haz. Resulta que las ondas son coherentes en una extensión de 10^{-3} centímetros aproximadamente. Por tanto, el interferómetro debe tallarse dentro de esa tolerancia.

Aunque para entender el funcionamiento del interferómetro no sea estrictamente necesario conocer todo lo que ocurre en el interior de cada una de las orejas, daremos el resultado porque no deja de encerrar su interés. Cuando una onda incidente llega a una oreja formando el ángulo correcto, el haz, de una manera inesperada, atraviesa el cristal perpendicularmente a su cara, dividiéndose en una parte transmitida y otra difractada tan sólo cuando sale de la oreja. A este comportamiento se le llama efecto Borrman.

El funcionamiento de un interferómetro depende de la relación entre los ritmos de detección de los dos detectores que reciben los haces de la tercera oreja. Cuando las dos componentes del haz escindido se recombinan en la tercera oreja, cada una de las componentes que inciden en la oreja origina un haz transmitido y otro difractado. Por tanto, el haz que recibe cada detector es, en realidad, suma de dos haces, el haz transmitido de uno de los haces escindidos y el difractado del otro. Si se aplica una fuerza para crear una asimetría entre los haces escindidos, habrá un desplazamiento en la fase de uno de los haces con respecto del otro. Esto, a su vez, dará lugar a un desplazamiento de fase entre los dos haces cuando van al primer detector y a un desplazamiento de fase diferente entre los dos haces cuando van al segundo detector. Puesto que cada neutrón ha de ir a alguna parte, la intensidad del haz total se conserva. Lo



DISPERSION DE LAUE Y DE BRAGG. Se trata de dos maneras de dispersión de un haz por los planos de átomos que forman un cristal. En la dispersión de Laue (*izquierda*) si el ángulo de incidencia es el correcto, el haz incidente (*I*) será dispersado por los planos perpendiculares a la cara del cristal. El ángulo correcto se conoce con el nombre de ángulo de Bragg (θ) y está definido por el cociente entre la longitud de onda y la distancia entre los planos atómicos. El resultado es un haz transmitido (*T*) y otro difractado (*D*). Esta clase de dispersión tiene lugar en el interferómetro de neutrones. En la dispersión de Bragg (*derecha*) un haz incidente que forme un ángulo de Bragg apropiado es dispersado por los planos paralelos a la cara del cristal, resultando un haz transmitido y otro reflejado (*R*).

cual implica que, si los haces que van a un detector se suman constructivamente, aumentando el ritmo de detección allí, los haces que van al otro detector deben entonces sumarse destructivamente, decreciendo la detección allá.

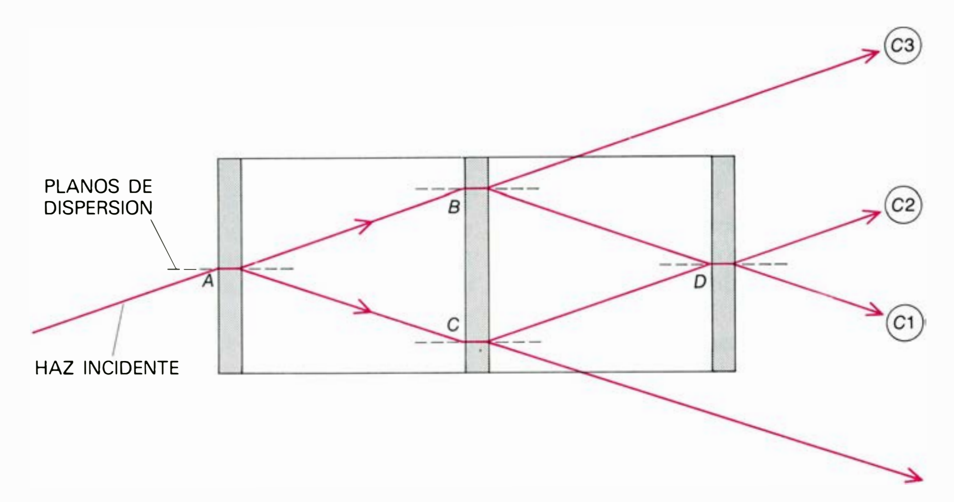
Imagínese el lector que todos los neutrones estuvieran llegando a un detector. Y suponga que aplicamos una fuerza débil a los haces de neutrones, una fuerza tan débil que apenas retrasara uno de los haces escindidos por una media longitud de onda, en relación con el otro haz en el curso de su recorrido a través del aparato. Este desplazamiento de fase debería ser suficiente para enviar todos los neutrones al otro detector. Es lo que hace el interferómetro de neutrones, un instrumento increíblemente sensible, capaz de tomar un haz escindido coherente de neutrones que ha recorrido alrededor de ocho centímetros y detectar que uno de los componentes del haz se ha rezagado con respecto al otro en menos de una distancia interatómica. Además, el interferómetro de neutrones transforma este mínimo desfase en un cambio macroscópico en el ritmo de detección de los detectores.

La asimetría necesaria entre los haces se puede introducir de varias maneras. Una de ellas estriba en interponer una lámina metálica en el camino de un haz; de este modo la lámina interacciona con el haz generando un desplazamiento de fase. Otra forma de hacerlo consiste en aplicar un campo magnético débil a uno de los haces. Por último existe la estratagema de crear un campo gravitatorio en el interferómetro al inclinarlo para que los haces se encuentren a alturas diferentes.

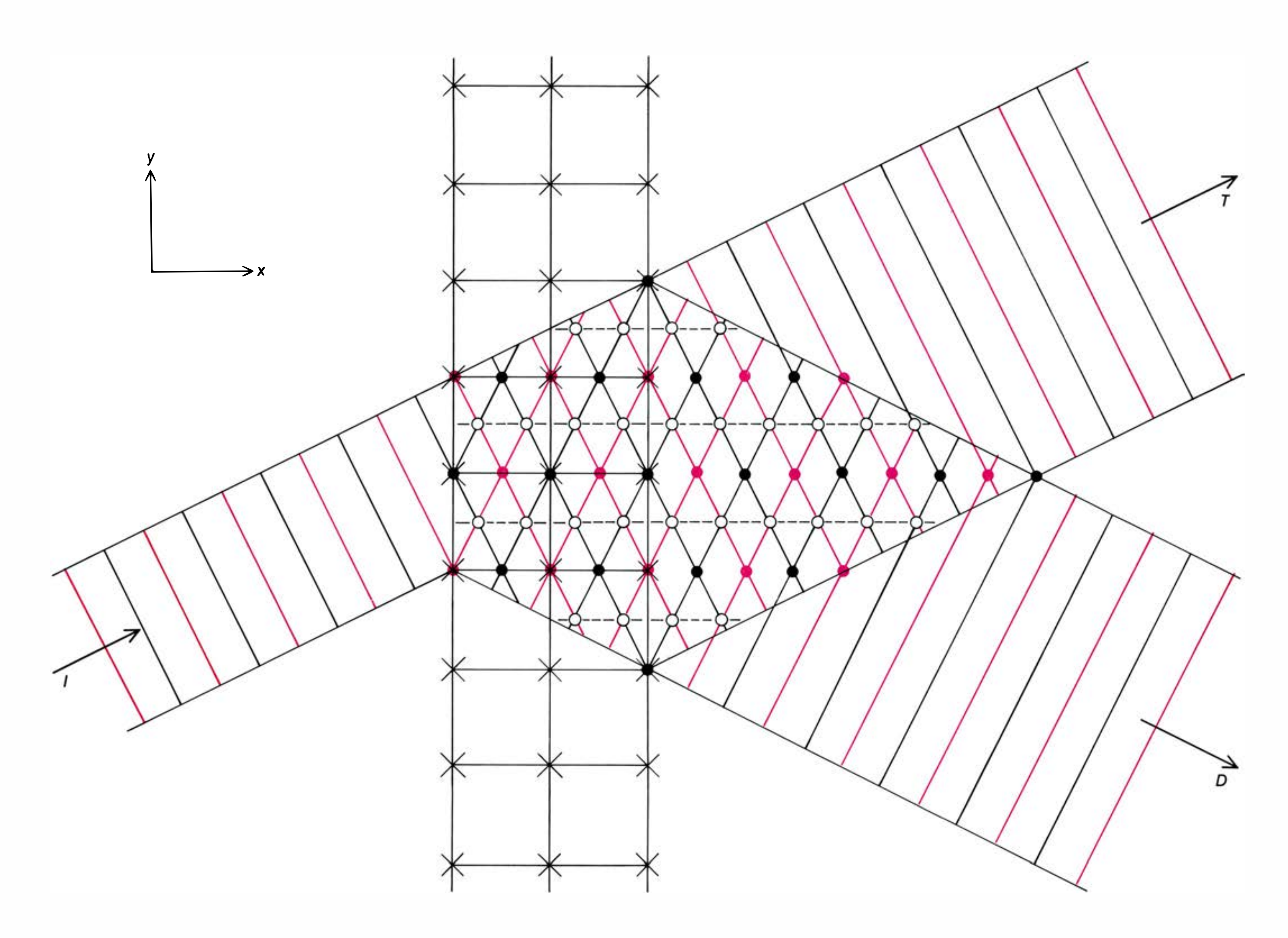
Aunque la interferencia de ondas de neutrones es similar a la interferencia de ondas luminosas, existen diferencias significativas entre ambas clases de ondas. Cuando se considera el neutrón como una partícula "clásica" puntual –es decir una partícula cuyo comportamiento puede quedar explicado, de un modo aproximado, por leyes físicas conocidas anteriormente a la aparición de la mecánica cuántica– entonces no tiene propiedades de onda. Estas propiedades sólo pueden ser explicadas por las leyes mecánico-cuánticas. Al estar determinada la longitud de onda del neutrón por la constante de Planck, que nunca entra en la física clásica, todos los efectos de interferencia son necesariamente procesos mecánico-cuánticos. La luz, por otra parte, es una onda en el dominio clásico; ello explica que sus propiedades ondulatorias no exijan una interpretación mecánico-cuántica.

El neutrón tiene una masa y un campo magnético, mientras que el fotón (el cuanto del campo electromagnético) carece de ellos. Ello significa que un campo magnético hará que el neutrón gire, pero no afectará al fotón. También significa que el neutrón interacciona mucho más fuertemente con la gravedad. Aunque las ondas luminosas pueden desviarse por la gravedad, en un interferómetro para ondas luminosas el efecto resulta despreciable. El efecto de la gravedad sobre la fase de las ondas de neutrones es, por el contrario, medible. La longitud de las ondas luminosas es de 10^{-5} centímetros, y puesto que la longitud de onda de un neutrón en un interferómetro de neutrones es de 10^{-8} centímetros, se pueden resolver efectos en una escala más pequeña.

En el experimento más importante que se ha llevado a cabo hasta ahora



INTERFEROMETRO DE NEUTRONES, visto desde arriba, para mostrar cómo un haz de neutrones incidente sufre dispersión de Laue por la primera oreja y luego otra vez por la segunda. En la tercera oreja los haces se recombinan y se dirigen a dos contadores de neutrones (*C1 y C2*). El tercer contador (*C3*) controla el haz original. La fase relativa de dos haces difractados (la fase del haz *ABD* frente a la del *ACD*) determina los ritmos de detección. Si el haz completo de salida incidiese sobre el contador *C1* un desplazamiento de fase relativo de media longitud de onda entre los rayos difractados, volvería a dirigir la totalidad del haz de salida hacia el contador *C2*. Dentro de cada oreja el haz de neutrones se propaga perpendicularmente a la cara del cristal (efecto Borrman) y se escinde en dos haces al salir del cristal.



EFECTO BORRMAN en un interferómetro de neutrones. Consiste en que un haz viaja inesperadamente a través de la oreja entera en una dirección perpendicular a la cara del cristal, antes de que se divida en una parte transmitida y otra difractada. El efecto Borrman se ve solamente en cristales perfectos. El cristal actúa como una guía de ondas: la dispersión múltiple de Laue genera una figura de ondas estacionarias en la dirección *y*, mientras que la componente *x* de la onda incidente fluye en la dirección *x*. (Una onda estacionaria es una onda en la que los antinodos y nodos son estacionarios.) La energía en un cristal fluye principalmente en la dirección *x* paralela a los planos de dispersión. El dibujo de ondas estacionarias tiene antinodos (*topos*) a lo largo de las líneas de núcleos atómicos (*cruces*) en los planos de dispersión, y por tanto interacciona fuertemente con el cristal de silicio. Existe otra onda coherente con nodos (*círculos*) en los núcleos de dispersión y así esta onda interacciona muy débilmente con el cristal.

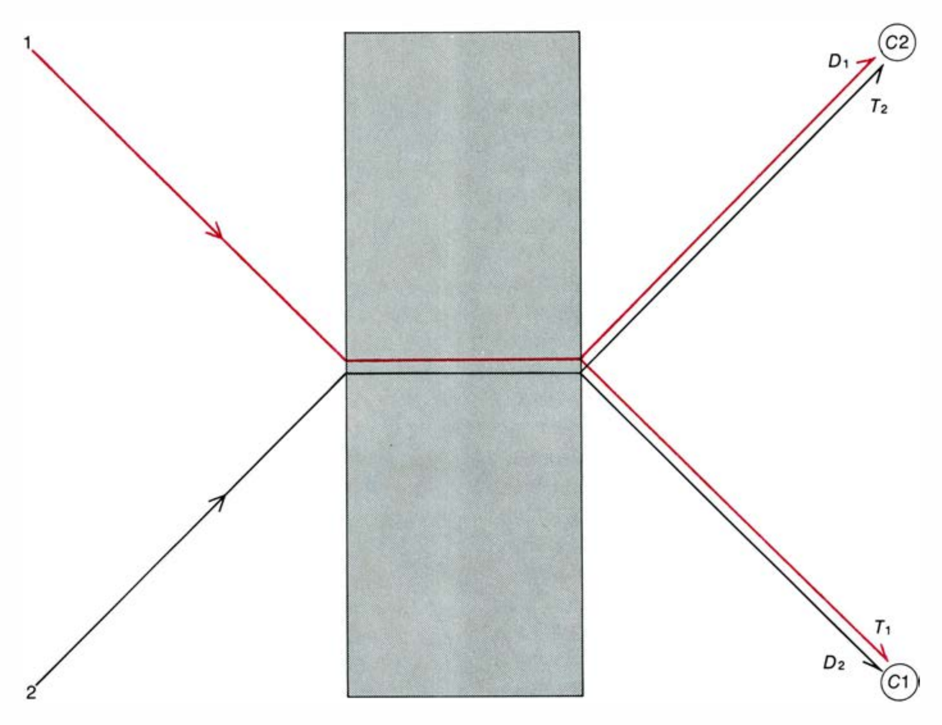
con el interferómetro de neutrones se midió el efecto de la gravedad de la Tierra sobre la fase de la onda de un neutrón. El experimento fue acometido por Roberto Colella, de la Universidad de Purdue, uno de nosotros (Overhauser) y Samuel A. Werner, de la compañía de automóviles Ford, en 1975. En su honor se le conoce por el experimento COW. Se introdujo el campo gravitatorio inclinando el interferómetro para que los dos haces de neutrones estuviesen a distinta altura. Con anterioridad al experimento COW, se había observado ya por vía experimental que el neutrón "caía" en el campo gravitatorio de la Tierra al igual que cualquier otra partícula masiva. Esta caída es, sin embargo, estrictamente galileana, o clásica. La cuestión reside en si puede observarse un efecto gravitatorio en la naturaleza ondulatoria del neutrón. El camino para averiguarlo es a través de un fenómeno de interferencia, para el cual el interferómetro de neutrones resulta en principio idóneo (con tal de que el efecto a detectar sea suficientemente grande).

La fuerza gravitatoria es muy débil a nivel atómico. Pero en el dominio macroscópico la fuerza gravitatoria predomina debido a los efectos gravitacionales acumulativos de un número elevado de partículas. La gravedad en la superficie de la Tierra es generada por los 10^{52} protones y neutrones que constituyen nuestro planeta. La repulsión electrónica entre dos protones es 10^{36} veces mayor que su atracción gravitatoria. Dos protones, separados a una distancia típica atómica de 10^{-8} centímetros, ejercen uno sobre otro una fuerza eléctrica que es 10^{16} veces mayor que la fuerza gravitatoria ejercida sobre cada uno de ellos por la Tierra entera.

Si la gravedad es tan débil a escala atómica, ¿cómo puede causar efectos de interferencia en el interferómetro de neutrones? La respuesta es que estos efectos pueden aparecer por la capacidad que tiene el interferómetro de neutrones de combinar efectos de interferencia en distancias macroscópicas.

La longitud de onda de un neutrón que entra en el cristal formando un ángulo apropiado es equiparable con la interdistancia de la red de 10^{-8} centímetros; y así cada vez que una onda pasa por un plano de átomos ha sufrido una oscilación. La diferencia de energía potencial gravitatoria entre las dos componentes de un haz separadas por 10^{-8} centímetros es 10^{15} veces menor que la energía cinética, aun cuando la función de onda del neutrón se conserve coherente a lo largo de una diferencia de altura de un centímetro (como puede hacerse en un interferómetro), la diferencia de energía potencial gravitatoria entre los dos haces será 10^{7} veces más pequeña que la energía cinética; por consiguiente, esta diferencia de energía tendría normalmente un efecto despreciable sobre la función de onda del neutrón.

Sin embargo, la onda es coherente a



RITMO DE DETECCION de un contador (*C1 o C2*). Dicho ritmo depende de la relación de fase entre los dos haces parciales que entran en él. Cuando los dos haces (*1* y *2*) que penetraron en la tercera oreja del cristal emergen de él, cada uno se divide en una componente transmitida (*T*) y una difractada (*D*). Cada contador recibe la componente transmitida de un haz y la reflejada del otro haz. Si la aplicación de una pequeña fuerza causa que la fase de uno de los haces, por ejemplo *2*, varíe en relación con la otra en una cantidad ξ, entonces la componente transmitida (T_2) también estará desplazada en ξ, y la componente difractada (D_2) estará desplazada en ξ más 180 grados, haciendo que las componentes se desfasen. El ritmo de detección de uno de los detectores aumentará y el del otro detector decrecerá, aunque la suma de ambos permanecerá constante porque cada neutrón debe ir a uno de los detectores.

través de los 10 centímetros de longitud del cristal; a lo largo de cuya distancia oscila 10^9 veces. Aunque la oscilación debida a la gravedad es 10^7 veces menor, en el curso de su recorrido a través del cristal la onda del neutrón logra oscilar cien veces más por razón de la gravedad. Aun siendo la gravedad débil, tiene un efecto medible sobre la función de onda, porque la onda de un neutrón es coherente en una escala macroscópica.

Para medir el efecto, se pasa primero el haz de neutrones a través del cristal cuando éste se halla horizontal. En esa situación, los dos haces escindidos en el interferómetro están a la misma altura y no hay efecto gravitatorio. Luego se gira el interferómetro alrededor del haz incidente para colocar los haces escindidos a alturas diferentes y, por tanto, a energías potenciales gravitatorias distintas. A medida que la diferencia de alturas se va acentuando, crece también la diferencia de fase, que se refleja en una diferencia en el número relativo de neutrones contado por los dos detectores. En el experimento COW la gravedad dio lugar a 20 oscilaciones extras, y en una versión mejorada del mismo la diferencia de fase debida a la gravitación se verificó con una precisión del 1 por ciento.

Debemos deslindar esta diferencia de fase del efecto lateral gravitatorio clásico. La gravitación también "tira" del cristal, y así, cuando se gira el cristal para poner un rayo encima de otro, la gravitación influye ligeramente, lo que a su vez afecta a la fase relativa entre los rayos. Afortunadamente, podemos controlar ese efecto clásico mediante un haz de rayos X. Además, insertando en uno de los rayos una banda de aluminio de 0,05 milímetros de espesor los investigadores indujeron una diferencia de fase extra igual a una cuarta parte de la oscilación. Este efecto ya conocido sirvió de control experimental para verificar que los neutrones no eran repelidos por la Tierra sino atraídos por ella.

El experimento demostró que un campo gravitatorio débil desplaza la fase de onda de un neutrón en la magnitud precisa predicha por la ecuación de Schrödinger. En otras palabras, la gravedad aparece en la ecuación al igual que otra fuerza cualquiera lo haría. Se esperaba ese resultado. Lo que no impedía que tuviera distintas implicaciones para la interpretación del principio de equivalencia en mecánica cuántica, que discutiremos más adelante. Por ahora señalaremos que Colella y uno de nosotros (Overhauser) han demostrado que el experimento verifica que el principio de equivalencia se aplica a escala microscópica, dominio donde rigen las leyes de la mecánica cuántica.

Imaginémonos un observador que está cayendo en el interferómetro con la aceleración de la gravedad. Para él, un neutrón del interferómetro no estaría cayendo en absoluto, puesto que ambos caen conjuntamente. El observador contemplaría al neutrón moviéndose a lo largo de una línea recta entre las colisiones con las orejas del interferómetro. También vería a las orejas acelerarse hacia arriba. Lo cual significa que ve un neutrón en un haz escindido aproximarse a la segunda oreja a una cierta velocidad y un neutrón en el otro haz escindido aproximarse a ella a diferente velocidad. La diferencia de velocidades provoca un desplazamiento en la frecuencia del haz de neutrones. Se trata del conocido efecto Doppler: un observador que se acerca a una onda ve llegar la cresta antes, y, por tanto, advierte una frecuencia mayor, mientras que un observador que se aleja de la onda percibe una frecuencia menor.

Hemos realizado un análisis detallado en el sistema de coordenadas del observador acelerado y hemos probado que el desplazamiento de fase global es el mismo que el desplazamiento de fase producido por la gravedad en el sistema de interferómetro. En otras palabras, si se acepta que la ecuación de Schrödinger rige para una partícula libre, hay que aplicarla tan sólo al caso de un haz incidiendo en un cristal acelerado y se habrá probado que este caso es equivalente al de un haz que "cae" incidiendo sobre un cristal estacionario. Se esgrime este razonamiento en lo que se conoce por forma fuerte del principio de equivalencia, punto que consideraremos más adelante.

Existe otra interpretación del experimento COW que es de sumo interés. De acuerdo con la teoría general de la relatividad, un campo gravitatorio afecta a la marcha de un reloj. En un potencial gravitatorio débil, y en un tiempo t, la diferencia de tiempo (Δt) existente entre dos relojes es $\Phi t/c_2$, donde Φ es la diferencia de energía potencial gravitatoria entre los dos relojes y c simboliza la velocidad de la luz. Todo el efecto de interferencia del experimento COW puede atribuirse a la diferencia entre el tiempo marcado por un reloj que se mueve con un haz y el otro reloj que se mueve con el otro haz.

La diferencia de tiempo, debida enteramente a la diferencia de energía potencial entre los dos relojes cuando se mueven a lo largo del interferómetro a alturas distintas, es el famoso corrimiento

hacia el rojo de Albert Einstein, predicho en 1916 en su artículo original sobre la teoría general de relatividad. Desgraciadamente, aunque su interpretación es muy sugestiva no es necesaria porque el efecto puede explicarse por medio de la teoría cuántica no relativista, en la que la gravitación recibe el tratamiento de una fuerza más, sin apelar para nada a la relatividad.

Volvamos ahora a otros dos experimentos de perfecto diseño, realizados con el interferómetro de neutrones. Se basa el primero en que el interferómetro gira con la Tierra mientras el haz de neutrones lo atraviesa. (El propio haz es independiente de la Tierra entre colisiones con las orejas.) Esta rotación, al igual que la gravedad, afecta a la fase del haz; aunque la lenta velocidad angular de una rotación cada veinticuatro horas produce un efecto sobre el haz en el interferómetro que es sólo del dos por ciento del efecto gravitatorio. Este reducido efecto fue, no obstante, detectado por Colella, Werner y J. L. Staudenmann, de la Universidad de Missouri, empleando un interferómetro sensible, construido con una precisión de hasta 10^{-4} centímetros mediante un procedimiento de modulación con una sierra de diamante, controlado ópticamente.

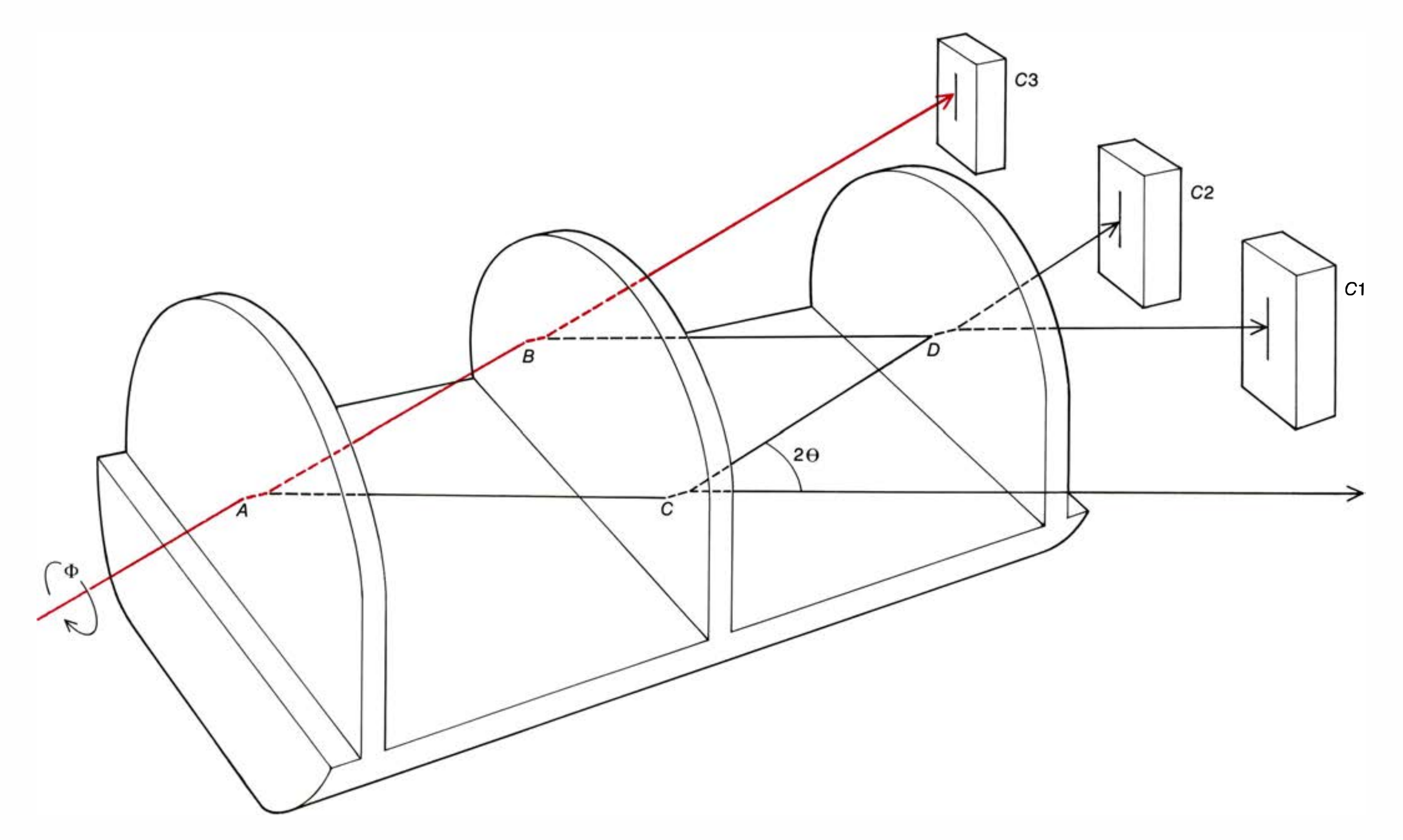
Esos físicos experimentales lograron separar el efecto débil gravitatorio del efecto, aún más débil, de rotación pasando los dos haces verticalmente a través del interferómetro, para que la gravedad repercutiese por igual en ambos y dejase por tanto la fase relativa intacta. Este experimento, versión cuántica de otro realizado por G. Sagnac a comienzos de siglo, verificó la aplicación de la ecuación de Schrödinger a un experimento llevado a cabo en un sistema de coordenadas acelerado. De paso, proporcionó una demostración mecánico-cuántica esotérica de la teoría de Copérnico de que la Tierra gira, para aquellos que aún abrigaban dudas.

El otro experimento, que se acometió en 1975 por un grupo en Estados Unidos y otro en Europa, aunque independientes entre sí, confirma una predicción sorprendente y directa de la mecánica cuántica. De acuerdo con la teoría cuántica, si el neutrón (o cualquier otra partícula con "spin", o momento angular intrínseco igual a un medio, como el electrón o el protón) gira 360 grados, la función de onda de la partícula cambia de signo.

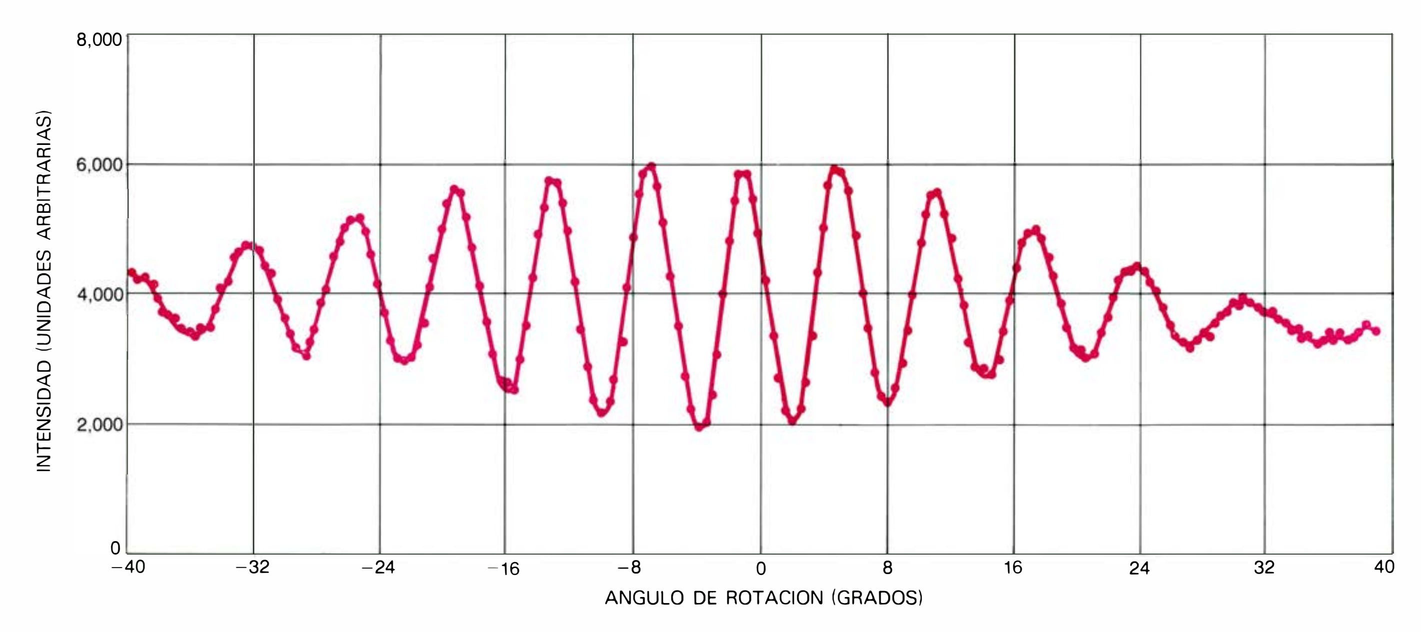
En física clásica, por supuesto, un objeto que girase 360 grados se hallaría exactamente en el mismo estado geométrico en que se encontraba antes del giro. El cambio de signo es posible en mecánica cuántica porque los resultados experimentales dependen sólo del cuadrado de la función de onda.

Aquí los neutrones se hicieron girar 360 grados al pasar un haz en el interferómetro a través de un campo magnético. Si los rayos interfieren de una forma constructiva antes de la aplicación del campo, interferirán destructivamente después de que éste se aplique, y viceversa. El neutrón deberá sufrir un giro de 720 grados por parte del campo para que no le afecte la rotación. Este resultado, contrario totalmente a la intuición clásica, constituye un ejemplo acabado de lo que Eugene P. Wigner ha llamado la "eficacia irrazonable" de la matemática abstracta en su capacidad de predecir los fenómenos físicos. De cualquier modo, se han verificado repetidamente las consecuencias de una rotación, por la sencilla razón de que el efecto de una rotación sobre una función de onda entra en muchos experimentos. Aunque era importante demostrar ese efecto directamente, el resultado no se puso nunca en duda. El experimento COW abrió un camino nuevo, porque hasta ese momento nunca un campo gravitatorio había afectado a las propiedades ondulatorias específicas de una partícula en un experimento mecánico-cuántico.

Para valorar la significación del expe-



DIFERENCIA EN ALTURA entre los haces en un interferómetro introducida girando el aparato alrededor del haz incidente (*AB*). Esto da lugar a una diferencia de potencial gravitatorio entre los haces, lo que altera sus fases. Esta alteración se muestra en un cambio en la cuenta de los detectores, que es una medida del efecto de la gravedad sobre las propiedades mecánico-cuánticas de la onda de un neutrón. (Ilustración de Dan Todd.)



LECTURA DEL PRIMER DETECTOR como una función del ángulo de giro del interferómetro de neutrones mostrada para un conjunto de datos típico. La lectura nunca decrece hasta cero porque los dos haces no son perfectamente coherentes. Estos datos provienen de una versión mejorada del interferómetro original de neutrones, que verificó el desplazamiento de fase debido a la gravedad con una precisión del 1 % del valor predicho.

rimento COW hemos de considerar la relación de la gravedad con las otras tres fuerzas naturales: la fuerza nuclear fuerte, que liga el núcleo, la fuerza electromagnética, que liga los átomos y determina la estructura química, y la fuerza nuclear débil, responsable de la mayoría de las desintegraciones nucleares. Se sabe que la gravedad controla la estructura a gran escala del Universo, aunque es extremadamente débil a escala microscópica. Einstein soñaba con lograr unificar los fenómenos a gran y pequeña escala en una vigorosa teoría. Sin embargo, no hubo hasta hace unos pocos años ninguna conexión experimental discernible entre ellas.

Cada una de las cuatro fuerzas de la naturaleza que se conocen hoy poseen distinta intensidad y actúan a diferentes escalas. Ello no ha sido óbice para que recientemente se construyera una teoría unificada de las fuerzas nucleares débiles y las electromagnéticas. Michael Faraday, James Clerk Maxwell y Einstein desarrollaron una superestructura en la que la electricidad y el magnetismo representaban dos aspectos del mismo fenómeno. Hoy se reconoce que las interacciones débiles constituyen un tercer aspecto del mismo fenómeno, que sería visible a energías extremadamente altas. El año pasado, se concedió el premio Nobel de física a Sheldon Lee Glashow y Steve Weinberg, de la Universidad de Harvard, y a Abdus Salam, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, por reconocer esta relación. Su trabajo es el primer paso hacia el descubrimiento de la "piedra filosofal", que descubriría una armonía en la naturaleza más allá de lo soñado por cualquier viejo alquimista. Hay indicios de que las interacciones fuertes puedan incorporarse en esa teoría, y atisbos de que la misma gravitación se integre también.

Queremos puntualizar, sin embargo, que existen buenas razones para mantener una actitud de prudente escepticismo acerca del papel de la gravedad en cualquier esquema unificado propuesto hasta la fecha. Por ejemplo, si aplicáramos las leyes básicas de la mecánica cuántica a situaciones en las que domina el campo gravitatorio, los fenómenos que predecirían serían difíciles de interpretar. Considérese un neutrón de masa m ligado gravitacionalmente a una partícula de masa M por la fuerza newtoniana GmM/r^2, donde G es la constante gravitatoria y r es la distancia entre las partículas. Esta situación es idéntica formalmente a la de un electrón y un protón ligados eléctricamente por la fuerza coulombiana e/r^2, donde e es la carga del electrón.

La energía y la separación de las dos partículas, en las órbitas más pequeñas que describen una alrededor de la otra, pueden calcularse fácilmente en teoría cuántica. El caso eléctrico es el átomo familiar de Bohr, y el caso gravitatorio se halla sustituyendo e por GmM. Para neutrones que se atraen entre sí, siguiendo este procedimiento se llega a una energía inconcebiblemente baja y a una separación desorbitadamente grande de 10^{25} centímetros, próxima al tamaño del Universo. Estos ridículos números incitan a preguntar si el concepto de coherencia de una onda, o para este aspecto el de función de onda, tiene sentido en dicho contexto.

Por otro lado, y de acuerdo con la teoría cuántica, las fluctuaciones gravitatorias sólo adquirirían valor significativo en dimensiones de 10^{-32} centímetros, una escala fantásticamente pequeña en relación con las dimensiones que nos son más familiares. Una extrapolación que descendiese hasta 10^{-32} centímetros sería una transición mayor que la que desde la escala macroscópica hasta la nuclear, que condujo al desarrollo de la mecánica cuántica y alteró por completo la imagen aceptada de actuación de la naturaleza.

Estas consideraciones no significan que se abandonen los intentos actuales de aplicar la teoría cuántica a la gravitación; tan sólo indican la necesaria precaución con que debe andarse en ese terreno. Puesto que los números son tan extraños, no hay razón para dar por sentada la teoría que los predice. A cada paso de su desarrollo la teoría se habrá de probar experimentalmente; ahora bien, dondequiera que se prediga un fenómeno correctamente, se habrá ganado una victoria intelectual muy valiosa. Antes del experimento COW carecía de fundamento la aceptación del modelo usual de la gravitación cuántica, incluso a nivel de campos gravitatorios muy débiles que actuaban como pequeñas perturbaciones.

Ni siquiera entonces así deberíamos darnos por enteramente satisfechos. Y ello porque persiste un problema conceptual profundo originado por la diferencia entre el tratamiento teórico usual

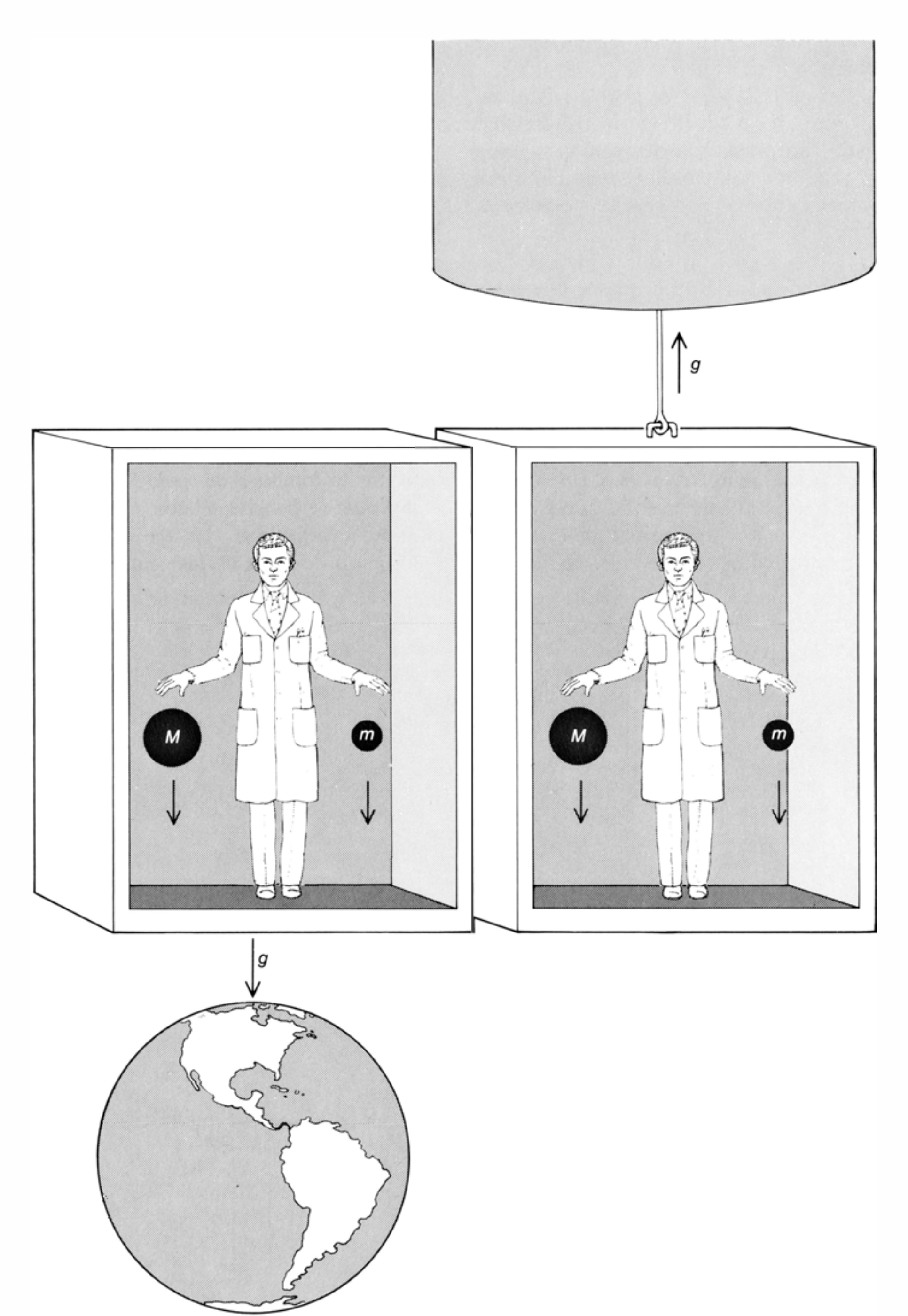
de los fenómenos gravitatorios clásicos y el de los fenómenos mecánico-cuánticos. La diferencia se basa en el papel que juega la masa en ambos tipos de fenómenos. Galileo observó que todos los cuerpos caen con la misma aceleración en un campo gravitatorio externo. Aquí "externo" significa que los cuerpos por sí son demasiado pequeños para contribuir de una manera medible al campo. Robert H. Dicke, de la Universidad de Princeton, ha llamado a esta observación el principio de equivalencia débil para distinguirlo de la formulación fuerte que discutiremos más adelante.

Desde un enfoque clásico, al abordar la cuestión de equivalencia se piensa en soltar una partícula con una velocidad y posición inicial. La gravedad da entonces a la partícula una aceleración definida. Si soltáramos una partícula de masa distinta con la misma velocidad y desde la misma posición, seguiría la misma trayectoria, porque la aceleración debida a la gravedad es independiente de la masa de la partícula. Dicho de otra manera: la posición y la velocidad constituyen las variables naturales a la hora de resolver el problema porque la masa no desempeña ningún papel intrínseco. De hecho, el problema puede plantearse de nuevo sin que aparezca la masa.

Einstein reconoció la significación de la observación de Galileo. Y vio que, puesto que todas las partículas que empiezan con la misma velocidad y posición siguen el mismo camino, la naturaleza de la partícula en sí no intervenía en absoluto. El movimiento de una partícula en un campo gravitatorio depende sólo de su entorno, es decir, sólo de las propiedades de espacio y tiempo. Para explicar por qué todas las partículas seguían la misma trayectoria curva, Einstein sustituyó el concepto de campo gravitatorio externo por el de un espacio-tiempo curvo. La teoría de la gravitación se redujo en efecto a una rama de la geometría.

Desde el punto de vista de Einstein diremos que la partícula obedece la ecuación de la geodésica: la partícula toma el camino "más corto" en el espacio-tiempo curvo. La ecuación de la geodésica reemplaza la ley clásica de inercia: las partículas libres en un espacio plano tienden a seguir la línea recta, que es por supuesto el camino más corto en el espacio plano. Al igual que la observación de Galileo, Einstein no habla de masa, sino de posición y velocidad. Podemos resumir este punto introduciendo el principio geométrico de equivalencia débil, válido en un enfoque clásico. El principio afirma que no existen en absoluto efectos físicos, en un campo gravitatorio externo, que dependan de la masa de una partícula puntual.

Podemos llegar a una formulación más general reemplazando el principio de equivalencia débil por el principio de equivalencia fuerte. Este principio sostiene que, en lo concerniente a las leyes físicas observadas localmente, estar en reposo en un campo gravitatorio equivale a estar en reposo en un sistema de referencia acelerado. El principio de equivalencia fuerte no sólo indica por qué todos los objetos deben caer con la misma aceleración en un campo gravitatorio, sino que, además, proporciona



CLASICO EXPERIMENTO "IDEAL" DEL ASCENSOR, desarrollado por Albert Einstein, que ilustra el principio de equivalencia fuerte: estar en reposo en un campo gravitatorio (*izquierda*) produce el mismo efecto que estar en reposo en un sistema de coordenadas acelerado (*derecha*). A la izquierda, un hombre en un ascensor en el espacio exterior experimenta un campo gravitatorio real debido a la gran masa próxima a él, y se siente atraído hacia el suelo. Si suelta una masa pequeña (*m*) y una masa grande (*M*) simultáneamente, caerán con la misma aceleración *g;* por tanto alcanzarán el suelo al mismo tiempo. Ahora imagínese en vez de eso que el campo gravitatorio se ha reemplazado por un cohete que empuja el ascensor hacia arriba con una aceleración uniforme *g* (*derecha*). El hombre aún se siente atraído hacia el suelo del ascensor con la misma fuerza. Cuando suelta las dos masas, mantendrán una velocidad constante hacia arriba, aunque el suelo del ascensor está subiendo con una aceleración *g* a su encuentro. Le parecerá que están cayendo con una aceleración *g*, como lo hacían en el campo gravitatorio. El ascensorista no distingue entre la situación de la izquierda y la de la derecha.

una poderosa herramienta para incorporar el campo gravitatorio en un sistema físico. Si se conoce cómo se comporta un sistema en ausencia de campo gravitatorio, el principio de equivalencia fuerte permite determinar el comportamiento del sistema en presencia del campo. Basta con trasladar el sistema a un sistema de coordenadas acelerado, lo que es equivalente a la introducción de un campo gravitatorio.

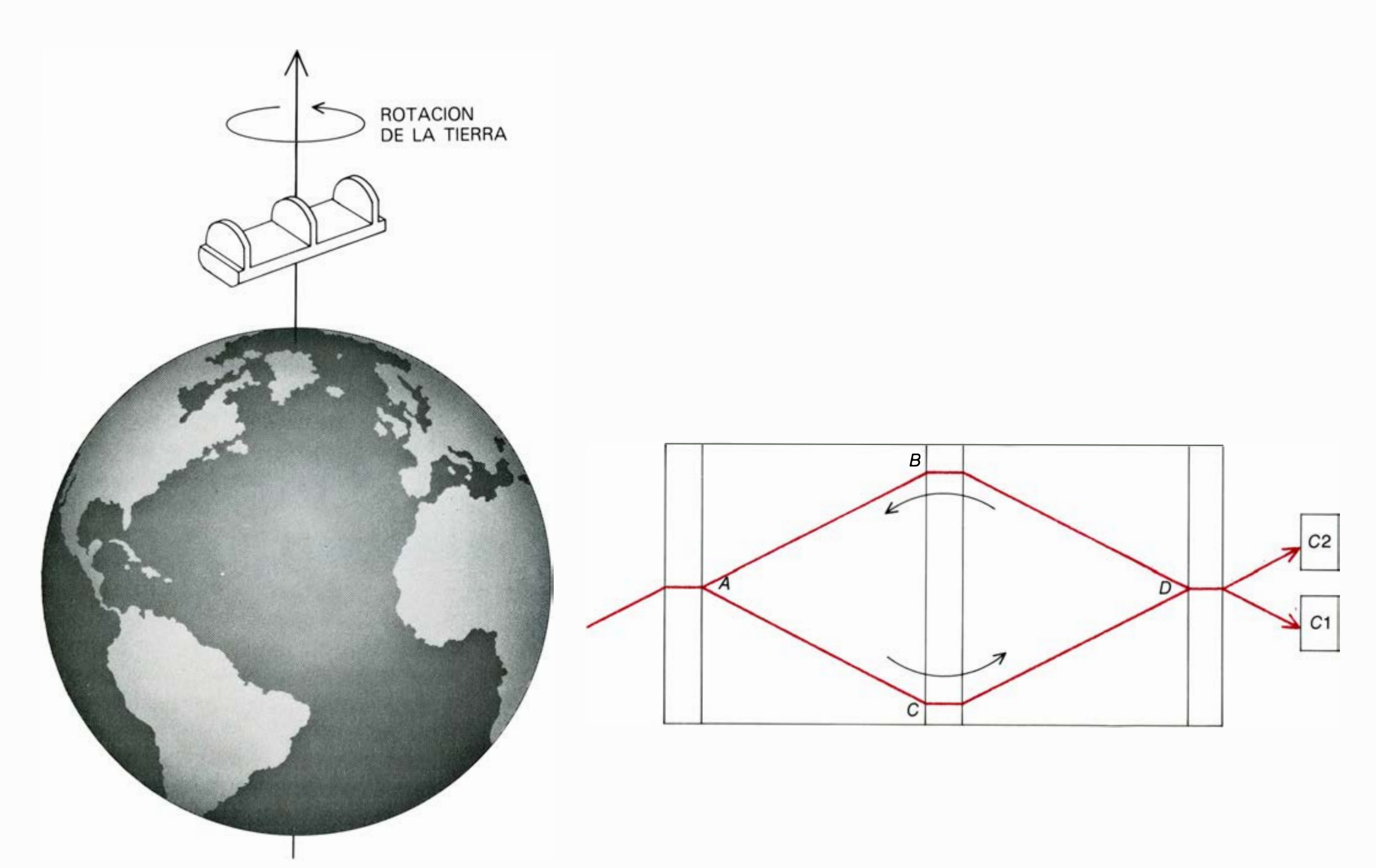
La teoría general de la relatividad especifica el procedimiento matemático para hacer esa transformación y para distinguir, en un orden superior, entre campos gravitatorios reales y los efectos de la aceleración. Así, una vez conocida la ecuación de Schrödinger para el caso sin campo gravitatorio, puede escribirse para el caso con campo gravitatorio. El experimento COW confirmó el principio de equivalencia fuerte.

Se diría que lo que hemos venido exponiendo acerca de la gravedad era puramente geométrico. Sin embargo y sorprendentemente, resulta que el experimento COW es incompatible con el principio geométrico de equivalencia débil, porque los efectos de interferencia en mecánica cuántica dependen de la masa. Sólo al tomar el promedio de los valores de los parámetros de la trayectoria desaparece la masa. ¿Cómo entra entonces la masa en la imagen cuántica? La respuesta yace en el mismo procedimiento de cuantificación. Problema conceptual al que antes aludimos.

La energía de un fotón es igual a la constante de Planck (h) multiplicada por la frecuencia (f). Esta ecuación se remonta al trabajo de Einstein de 1905. Aunque la ecuación es muy simple desde el punto de vista matemático, resulta de gran hondura física porque pone en relación dos conceptos dispares. La frecuencia es una propiedad específicamente ondulatoria, mientras que la energía es una característica dinámica que podemos medir cuando la materia absorbe o emite un fotón. La ecuación para la energía es equivalente a la afirmación de que el momento del fotón (p) es igual a la constante de Planck dividida por la longitud de onda (λ).

A Louis de Broglie debemos la aplicación de la fórmula $p = h/\lambda$ para definir la longitud de onda de las ondas que la mecánica cuántica atribuye a la materia ordinaria. Al igual que la fórmula de la energía $E = hf$, la fórmula del momento conecta una propiedad de onda, la longitud de onda, con una propiedad dinámica, el momento de la partícula. La interferencia entre ondas materiales, parte esencial en la mecánica cuántica, es el fenómeno que sirve de base en el interferómetro de neutrones. Puesto que la longitud de onda de un neutrón depende del momento, que es igual a la masa por la velocidad, depende de la masa también. Ello significa que la masa del neutrón se incorpora desde el principio en la naturaleza ondulatoria del neutrón. En otras palabras, la importancia de la masa por la velocidad, no de la velocidad, en mecánica cuántica tiene raíces teóricas profundas al par que se asienta sobre la base firme de la comprobación experimental.

En cierto sentido, la cuestión de la importancia relativa de la velocidad y el momento se remonta a los distintos enfoques con que acometieron la mecánica Galileo y Newton. Galileo observó que todos los objetos recibían igual aceleración por parte de la gravedad. Su here-



EFECTO DE LA ROTACION DE LA TIERRA sobre la figura de interferencia de los haces de neutrones (efecto Sagnac). Se comprende mejor si se imagina el interferómetro de neutrones en el Polo Norte (*izquierda*). A medida que la Tierra gira, el interferómetro lo hace con ella. El haz de neutrones, sin embargo, viaja en una línea recta entre las colisiones con las orejas del interferómetro, porque no está ligado a la rotación de la Tierra. Una vista superior (*derecha*) del interferómetro muestra que la rotación obliga a un lado (C) a alejarse del haz y al otro lado (B) a aproximarse hacia él. Estas velocidades relativas diferentes darán lugar a un desplazamiento en la frecuencia entre las dos componentes del haz escindido de neutrones. Se trata del conocido efecto Doppler. El resultado neto es que la figura de interferencia de los rayos de neutrones está desplazada por la rotación de la Tierra. La magnitud del desplazamiento difiere en otras latitudes de nuestro planeta, aunque persista el mecanismo que sirve de base.

dero intelectual es Einstein, quien describió la observación en términos geométricos. Por otra parte Newton reconoció que las aceleraciones son causadas por fuerzas que cambian los momentos, que dependen de la masa. Sólo en el caso de la gravedad la masa desaparece.

Por los años 1820-1829, William Rowan Hamilton reformuló las leyes de la mecánica de Newton en el sentido de que las leyes de la mecánica no hubieran de depender del sistema de referencia elegido para describir el problema. La formulación da preeminencia a cualquier simetría que éste presente. El mismo Hamilton fue consciente de que su formalismo expresaba una analogía poderosa entre los fenómenos de partículas y los fenómenos ondulatorios, una analogía que Schrödinger aprovechó 100 años más tarde al desarrollar la mecánica cuántica, cuando los hechos experimentales lo exigieron. El formalismo tiene como variables básicas el momento y la posición, y engarza perfectamente con el trabajo de de Broglie. En virtud de ello, la mecánica cuántica predice que los fenómenos dependientes de fase, estén o no en un campo gravitatorio, dependen de la masa a través de su longitud de onda. Esta característica es intrínseca a la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica predice con claridad los efectos que se verán en un campo gravitatorio débil, como el experimento COW. La interpretación gravitatoria clásica, sin embargo, se formula geométricamente, aunque no en función de la posición y la masa, sino en términos de la posición y el momento; las dos teorías no hablan, por tanto, el mismo lenguaje. Las dos grandes tradiciones, la geométrica de Galileo y la dinámica de Newton, que parecen haberse encarrilado por direcciones diferentes durante tres siglos, se enfrentan, de pronto, una con otra en la aplicación de la teoría cuántica a la gravitación. No es en modo alguno trivial, pues, que el experimento COW haya demostrado que la teoría cuántica rige en presencia de campos gravitatorios.

Por ejemplo, sin la confirmación experimental del experimento COW ¿resultaría tan evidente que el potencial gravitatorio correcto que se añade a la ecuación de Schrödinger es simplemente el clásico? En física clásica, el potencial tiene una forma que garantiza que la masa desaparezca del problema. Pero en mecánica cuántica no es éste el caso. Por ejemplo, en el átomo gravitatorio de Bohr, donde una partícula de masa m está ligada a una partícula mucho más pesada de masa M, el radio del estado cuántico fundamental es una función de la masa m. Esto significa que m puede ser determinada a partir de una medición del radio en este estado. La masa desaparece sólo para valores promedios sobre estados con un elevado número cuántico, que se comportan, en líneas generales, de un modo clásico.

Puesto que la mecánica cuántica contradecía el principio geométrico de equivalencia débil, con su requerimiento de que la masa desaparezca del problema, se hacía imperioso comprobar la ecuación de Schrödinger en un experimento donde las fuerzas gravitatorias estuviesen presentes. La prueba era necesaria aunque la ecuación de Schrödinger se haya acreditado como de enorme éxito para los problemas no gravitatorios. El experimento COW fue esa prueba y demostró de manera convincente que la ecuación de Schrödinger muestra su validez también en presencia de los campos gravitatorios.

Habida cuenta de que el desplazamiento de fase depende de la masa aún en el caso de un campo gravitatorio, visto en retrospectiva parece casi accidental que la masa desaparezca en las ecuaciones gravitatorias clásicas. Weinberg ha puesto de relieve que la mayoría de las características del campo gravitatorio pueden derivarse a partir de sus propiedades de simetría matemáticas, cosa que es cierta para cualquier otro campo en teoría cuántica. Esta interpretación tiende a molestar a algunos teóricos que prefieren pensar en la gravitación como algo intrínsecamente relacionado con la geometría. Sin embargo, puesto que el experimento COW confirma la aplicación de la mecánica cuántica aún en presencia de la gravitación, incluyendo la dependencia no geométrica de la masa, el experimento parece constituir un paso para minar el punto de vista puramente geométrico.

No obstante, hay algo extraño en todo esto. Y ello es que, en la mayoría de los casos donde en la teoría clásica una simetría se manifiesta, la versión cuántica de ella tiende a reforzarla con vigor, no a eliminarla. El fracaso de la concepción geométrica de la gravitación clásica en el dominio de la mecánica cuántica contradiría esa tendencia. Quizá la naturaleza almacena sorpresas mayores para los físicos, antes de que éstos terminen la tarea de unir armoniosamente la teoría de la gravitación y la de la mecánica cuántica. Einstein dijo en cierta ocasión que "la naturaleza es sutil, pero no maliciosa". Desgraciadamente, se necesita a veces una gran altura de miras para valorar semejante distinción.

Ciencia y sociedad

Un empalmador electrostático

La nueva edición del premio "García Cabrerizo" a la invención le ha sido concedido al ingeniero textil Carlos Pujol por su trabajo sobre un empalmador electrostático, que él denomina "Sensenus". Consigue el empalmado de los hilos de filamento discontinuo regenerando su estructura; no se aprecia la unión y su resistencia es igual a la de cualquier otro punto del hilo normal. Aunque el procedimiento recuerda el manual clásico, difiere de éste en el recurso a medios neumáticos y electrostáticos. La precisión con que se consigue la unión constituye otra ventaja sin precedentes en la historia de la tecnología textil.

Las innovaciones que supone el nuevo empalmador electrostático afectan a la regeneración del hilo, que es absoluta, y a la utilización por primera vez del efecto electrostático. En la regeneración del hilo por este método se mantiene la misma estructura, regularidad y resistencia, salvando la laguna del nudo con las limitaciones que éste oponía a las posibilidades de purgado y bobinado automático. Y se aprovecha el efecto electrostático, rompiendo así un viejo prejuicio acerca de su empleo en fabricación textil.

La presencia de la electricidad estática, como inoportuno compañero de viaje, aparece al iniciarse los procesos de mecanización en hilatura. Se genera por el roce entre fibras y materiales de distinta naturaleza en las fases de estiraje y cardado o en el simple roce entre hilos en la preparación para el tisaje. Aumenta al elevarse la velocidad. Este inconveniente se agrava en la manufactura de fibras sintéticas, contrarrestándose mediante el uso de antiestáticos que se adicionan a la fibra o bien instalando las condiciones ambientales adecuadas de humedad y temperatura para provocar las descargas, que llegan a ser insoportables.

La posibilidad de aprovechar el efecto electrostático para contribuir al control del desplazamiento de las fibras ha sido objeto de varios esfuerzos de investigación, que apenas si han superado el nivel de ensayo experimental, desde su aplicación a aparatos de laboratorio –pilosímetros– hasta procesos de hilatura de rotación electrónica ("electron spinning").

De acuerdo con la teoría molecular de la estructura de la materia, cada molécula del cuerpo posee cargas positivas y negativas; aquéllas constituyen el núcleo y éstas los electrones que gravitan a su alrededor. En las moléculas neutras, las cargas se hallan equilibradas. Cuando la fuerza que retiene los electrones en sus órbitas es débil, éstos se liberan dejando a la molécula con un exceso de carga positiva. Inversamente, cuando atrae electrones suplementarios la carga es negativa. El desplazamiento de los electrones genera la corriente eléctrica, que varía según los cuerpos –conductores o dieléctricos– y según el grado de movilidad de los átomos y las moléculas.

En los cuerpos conductores aparece cierto número de cargas suficientemente libres para desplazarse cuando se someten a la acción de un campo, aunque sea débil. Por contra, en los cuerpos aislantes, las cargas son solidarias y permanecen localizadas aunque se aporte un suplemento. Existe una gradación de unos cuerpos a otros. Y podemos considerar así aquellos cuerpos que por sus características específicas reciben la denominación de "semiconductores", en los que, al variar las condiciones externas –humedad y temperatura–, pueden bascular de una a otra categoría. Cuando eliminamos las ceras, y en un ambiente absolutamente seco, el algodón se comporta como un buen aislante; por contra, en su estado natural, y en atmósfera húmeda, su conductividad aumenta notablemente.

Al poner en contacto íntimo dos cuerpos, sin que estén sometidos a ninguna influencia exterior, los electrones situados en la superficie pueden desplazarse de un cuerpo al otro, advirtiéndose modificaciones en su carga electrostática cuando los separamos. Se ha confirmado que esta carga es tanto más intensa cuanto mayor es la presión ejercida y mayor la rapidez con que se produce la separación. La lana, el nylon, el nylon viscosa y el algodón se cargan positivamente cuando entran en contacto con partes metálicas; el rayón acetato, las fibras acrílicas y las polivinílicas se cargan negativamente. En virtud de la naturaleza de semiconductor del algodón, éste se carga negativamente, según la humedad ambiente, en el roce con partes metálicas, y, positivamente, en atmósfera saturada y húmeda.

Los cuerpos sometidos a un campo electrostático experimentan ciertas transformaciones y se comportan como si dispusieran en su superficie de cargas electrostáticas. La molécula del dieléctrico posee una configuración electrónica simétrica, y el centro de gravedad de las cargas negativas coincide con el de las cargas positivas. La presencia de un campo exterior deforma la molécula, desplazando los centros de gravedad cierta distancia; si suponemos que es 1 el valor de la distancia y Q el de las cargas, aparecerá el momento $Q \times 1$. Ello puede provocar un efecto dinámico sobre la fibra, que lo desplace desde una posición perpendicular al campo, orientándolo paralelamente. No obstante, esta fuerza es limitada, porque es muy pequeña la posibilidad de la carga superficial.

Reduzcamos la exposición a un modelo simple. Los efectos a que podría estar sometida una fibra de longitud L equivaldrían a una repartición de sus cargas superficiales en un elipsoide de revolución de eje mayor $L = a$. De acuerdo con la ley de Coulomb, la fuerza ejercida sobre las cargas unitarias situadas en el campo sería: $F = Q \times E$, donde Q simboliza la carga y E, el gradiente electrostático. La carga máxima posible dependerá de la constante dieléctrica, de la proyección del gradiente electrostático sobre el eje mayor a y de cierta relación matemática entre los semiejes de la elipse.

Al margen del elevado potencial requerido, la intensidad precisa es muy escasa, pudiéndose conseguir mediante un dispositivo de efecto piezoeléctrico. Lo cual le permite plena autonomía y gran simplicidad, pues no necesita de instalaciones supletorias para producir la alta tensión. Además, resulta inocuo a efectos de riesgos de provocación de incendios. La supresión del nudo como defecto de calidad tiene su reflejo económico en la reducción de causas de roturas en el proceso de tisaje y en tejido de género de punto. Desde el punto de vista técnico, optima las posibilidades

del purgado electrónico, hasta ahora limitado por el equilibrio entre los defectos tolerables y los inaceptables eliminados y sustituidos por nudos. Al crecer las posibilidades de purgado, se eleva también el número de empalmes.

Nueva interpretación de los manuscritos del Mar Muerto

A lo largo de los 33 años transcurridos desde que unos beduinos descubrieron rollos manuscritos en unas cuevas de Qumran, cerca del Mar Muerto, muchos especialistas han expresado su apoyo a la hipótesis de que los rollos pertenecen a una biblioteca, del siglo I antes de Cristo, de una secta ascética judía, los esenios, citados en los escritos de Josefo y Plinio el Viejo, y que, según algunos biblistas, ejercieron cierta influencia sobre Jesús. En un número reciente de los *Proceedings of the American Philosophical Society,* Norman Golb, de la Universidad de Chicago, argumenta en contra de la hipótesis esenia y sugiere otra hipótesis alternativa.

En favor de la hipótesis se aduce lo siguiente. En los rollos del Mar Muerto se incluyen libros de la Biblia y de los apócrifos, así como otras obras hasta entonces desconocidas, entre ellas un manuscrito que los especialistas denominaron Manual de Disciplina. Están escritos en hebreo antiguo. Cerca de las cuevas donde se hallaron estas obras se encuentran unas ruinas denominadas Khirbat Qumran. Las excavaciones sacaron a la luz un edificio de amplias habitaciones. En una de ellas, que medía 4 por 13 metros, se encontraron mesas, pupitres y tinteros con tinta seca en su interior. En las cercanías apareció un cementerio con más de 1000 tumbas.

Se supone que las ruinas corresponden a un monasterio de los esenios, que Plinio califica de "pueblo solitario... que vive sin mujeres", próximo al Mar Muerto. Lo cual corrobora que los preceptos contenidos en el Manual de Disciplina concuerdan con los de los esenios, según nos transmitieron los escritores antiguos. Los rollos fueron colocados en las cuevas por los esenios para protegerlos de los romanos, que ocuparon el supuesto monasterio en el 68 d. de C., momento que marca el fin de la secta, por dispersión o bien por masacre.

Las pruebas contra la hipótesis esénica son varias. Por un lado, se cree actualmente que los miles de fragmentos de pergamino o papiro, además de manuscritos mayores, encontrados en las cuevas próximas a Khirbat Qumran son

restos de unos 800 rollos diferentes. De ahí que los rollos que parecen tener carácter esénico (en particular el Manual de Disciplina) sólo constituyan una minoría. Tampoco aparece ninguna alusión al celibato en los manuscritos, incluyendo el Manual de Disciplina. Es más, la apertura de 43 tumbas en el cementerio de Khirbat Qumran reveló que siete de ellas pertenecían a mujeres y cuatro a niños. Los defensores de la hipótesis esénica replican que tales tumbas se encuentran en cementerios anejos y que los escritos de Josefo sugieren la existencia de una subsecta de esenios en la que estaba permitido el matrimonio.

Un segundo punto tiene que ver con los descubrimientos (en 1951, 1960 y 1961) de varios documentos, en las proximidades del Mar Muerto, que no son copias, transcritas por escribas, de textos espirituales. Hay cartas, actas y contratos; hacen referencia a hechos históricos conocidos, en particular a revueltas judías contra los romanos, y citan lugares concretos del desierto de Judea. Se sorprende Golb de que no se hayan encontrado cartas o documentos, ni personales ni oficiales, en las proximidades de las ruinas de Qumran, supuesto asiento principal de los esenios durante 200 años.

Un tercer argumento es que tanto Timoteo I de Seleucia, escritor sirio aproximadamente del 800 d. de C., como Orígenes, autor alejandrino de la tercera centuria, señalan descubrimientos de manuscritos hebreos en el desierto de Judea cerca de Jericó. De hecho hay cuevas más próximas a Jericó que las de Qumran, pero si los manuscritos se descubrieron en ellas, entonces la ocultación de manuscritos en cuevas era una práctica bastante extendida, no limitada a la vecindad de las supuestas ruinas esénicas. Entre 1963 y 1965 se efectuaron excavaciones en Masada, la fortaleza situada en una cumbre, al sur de Qumran, próxima a la costa sur occidental del Mar Muerto, y defendida por los judíos del 72 al 73 d. de C. en un último acto de resistencia a los romanos. Se descubrieron fragmentos de 14 rollos. Uno es un manuscrito denominado Cantos del Sacrificio del Sabbath, obra también hallada en Qumran.

Para Gold, los descubrimientos de manuscritos en el desierto de Judea, incluidos los encontrados cerca de Khirbat Qumran, evidencian un esfuerzo por parte de los judíos de preservar la literatura israelita, religiosa y de otro tipo, en un momento de sometimiento al poder romano. "Es razonable suponer", escribe, "que los que transportaban de forma clandestina objetos de importancia intentaran hacerlo en zonas aún no controladas por los romanos; pero en el verano del 68 d. de C. el único territorio no sometido era la porción de Judea situada al este y al sur de [Jerusalén], en otras palabras, el área en que se descubrieron rollos hebreos en los siglos tercero, octavo y vigésimo".

Quinientos millones más

El grupo de investigación de paleobiología precámbrica de la Universidad de California en Los Angeles ha presentado pruebas de que bacterias fotosintéticas habitaron, hace unos 3500 millones de años, un lugar de aguas someras en lo que hoy es Australia occidental. El descubrimiento añade unos 400 o 500 millones de años al registro de vida sobre la Tierra y sugiere de forma paladina que el primer organismo del planeta debió originarse incluso antes.

La prueba es un estromalito de sílex de finas bandas, estructura formada por el crecimiento y la actividad metabólica de microorganismos, tanto en el pasado remoto como en el presente. Fue descubierto en 1977 por J. S. R. Dunlop, estudiante entonces de la Universidad de Australia Occidental, en una alejada zona desértica del estado apodado Polo Norte por mineros del siglo pasado. Malcom R. Walter, de la Oficina Australiana de Recursos Minerales, perteneciente al grupo de investigación de 15 hombres de la UCLA, ha analizado el estromatolito, llegando a la conclusión de que fue producido por bacterias coloniales filamentosas que, a juzgar por el grosor de las bandas de crecimiento más finas, no median más de 20 micrometros, al menos en una dimensión. Un ejemplo viviente de un organismo de este tipo es *Chloroflexus*, bacteria fotosintética verde que forma estromatolitos en las fuentes termales.

Cualquiera que sea la verdadera identidad de las formas de vida microscópicas, la variabilidad ambiental debió de exponerlas intermitentemente a la atmósfera, y la variación diaria de temperatura debió ser extrema. Su supervivencia, a pesar de la posible radiación ultravioleta, sugiere que la Tierra había ya desarrollado una pantalla protectora de ozono.

Al comentar el descubrimiento en *Nature*, Walter, Dunlop y R. Buick, colega de Dunlop en la Universidad de Australia Occidental, señalan que el microorganismo debió de haber desarrollado alguna estrategia para soslayar el peligro de enterramiento por los sedimentos, pues fue la aplicación de esta estrategia lo que condujo al crecimiento del estromatolito. No puede asegurarse que el mecanismo fuera una respuesta a la atracción de la luz solar, como lo es en organismos productores de estromatolitos menos antiguos. Los tres investigadores concluyen que, incluso en un estadio tan primitivo de la historia terrestre, "existió una comunidad de organismos adaptados a la vida en un ambiente adverso y fluctuante".

El homínido Laetoli n.º 18

¿Cuándo apareció *Homo sapiens*? Las estimaciones efectuadas son vagas, y van desde más de un millón de años hasta hace tan sólo 50.000. Son aún demasiado imprecisas. El análisis de un fósil humano primitivo encontrado hace cuatro años en el Africa oriental quizá logre reducir tan amplio espectro. Los análisis indican que el hombre moderno comenzó su evolución a partir del precursor *Homo erectus* hace entre 150.000 y 90.000 años.

La muestra fósil fue hallada por Mary Leakey y sus colaboradores en el campamento de Laetoli, en Tanzania. Se trata de una bóveda craneana y mandíbula superior bastante completas aunque muy fragmentadas. Las 22 piezas aparecieron mientras limpiaban el lecho sedimentario de un antiguo río; los límites temporales inferior y superior de la muestra se desprenden del contexto geológico.

La señora Leakey y dos de sus colaboradores del departamento de anatomía de la St. Thomas's Hospital Medical School de Londres han publicado en *Nature* una primera descripción de la muestra: el homínido Laetoli n.º 18. La abertura de las suturas craneanas sugiere que el H.L.18 tenía entre 18 y 30 años de edad cuando falleció; el desgaste del molar superior que se ha conservado sitúa la edad de la muerte más próxima a los 30 que a los 18. La capacidad craneana estimada es de 1200 centímetros cúbicos, superior a la media de *Homo erectus*, que es de 1000 centímetros cúbicos, pero inferior a la media de *Homo sapiens*, cifrada en 1350 centímetros cúbicos. (*Sapiens* varía de 1200 a 1800 centímetros cúbicos.)

L.H. 18 presenta una mezcla de caracteres anatómicos modernos y primitivos. Moderno es el perfil redondeado de la parte posterior del cráneo y la expansión general de éste, que se refleja en la notable capacidad craneana. Primitivos son los prominentes arcos superciliares, la frente de escasa entidad y la pesadez de los huesos. Los investigadores concluyen que, de someter al H.L. 18 a un análisis anatómico más detallado, es probable que llegue a ser considerado un primitivo ejemplo del hombre moderno del Africa oriental.

Mielina

Envuelve las fibras nerviosas y les proporciona aislamiento eléctrico. Hace posible que el cerebro posea un gran número de circuitos en un volumen reducido y una rápida propagación de señales con poco consumo de energía

Pierre Morell y William T. Norton

En todos los animales vertebrados superiores la división del tejido cerebral y de la médula espinal en regiones blancas y grises –sustancia blanca y sustancia gris– resulta evidente incluso a simple vista. La proporción de sustancia blanca respecto a la gris aumenta a medida que se asciende en la escala evolutiva. En el hombre la sustancia blanca, de aspecto brillante, representa más del 40 por ciento de una sección transversal del cerebro. Los nervios que discurren por el organismo presentan también un aspecto blanco brillante. El examen microscópico muestra que la sustancia blanca consta de una serie de cilindros estrechamente empaquetados, la mayoría de los cuales tienen una cubierta lipídica de color blanco. Se trata de los axones, las fibras de las neuronas o células nerviosas, encargados de transmitir las señales eléctricas características de estas células. La cubierta lipídica es la mielina. El patólogo alemán Rudolf Virchow, al que se atribuye la denominación de mielina, describió esta sustancia en 1864. Utilizó este nombre, derivado del griego *myelós*, médula, al observar que la mielina era especialmente abundante en la médula, o parte central del cerebro.

La abundancia de mielina en el sistema nervioso se explica por sus propiedades aislantes que incrementan la velocidad de conducción de los impulsos nerviosos. La velocidad de conducción de una fibra nerviosa desnuda (desprovista de capa aislante de mielina) aumenta aproximadamente con la raíz cuadrada del diámetro de la fibra, de modo que, para duplicar la velocidad, el calibre de la fibra debe incrementarse cuatro veces. En cambio, la velocidad de conducción de una fibra nerviosa recubierta de mielina aumenta aproximadamente con el diámetro de la fibra, de forma que doblar la velocidad requiere sólo duplicar el calibre. El ahorro de espacio es sorprendente: a 37 grados Celsius una fibra sin mielina debería alcanzar varios milímetros de diámetro para conducir a una velocidad de 100 metros por segundo, que es la velocidad de una fibra mielínica de 20 micrometros de diámetro, es decir, la cincuentava parte de un milímetro. Dicho de otra forma, si la médula espinal humana estuviera constituida únicamente por fibras nerviosas desnudas, debería tener varios metros de diámetro para mantener sus velocidades de conducción.

Las ventajas en cuanto a ahorro energético son igualmente sorprendentes. Una fibra nerviosa mielínica de rana de 12 micrometros de diámetro conduce los impulsos nerviosos a una velocidad de 25 metros por segundo. Para la misma velocidad de conducción el axón gigante, amielínico, del calamar requiere un diámetro de 500 micrometros y utiliza una cantidad de energía 5000 veces mayor. Por dos razones al menos resultaría poco práctico para un sistema nervioso complejo carecer de una sustancia como la mielina: las necesidades energéticas y los requerimientos especiales resultarían excesivos. Si la mielina tiene alguna desventaja, ésta es que se necesita en gran cantidad. La pérdida de capas de mielina o de las células que las producen y la disponen alrededor de las fibras nerviosas da lugar a enfermedades como la esclerosis múltiple.

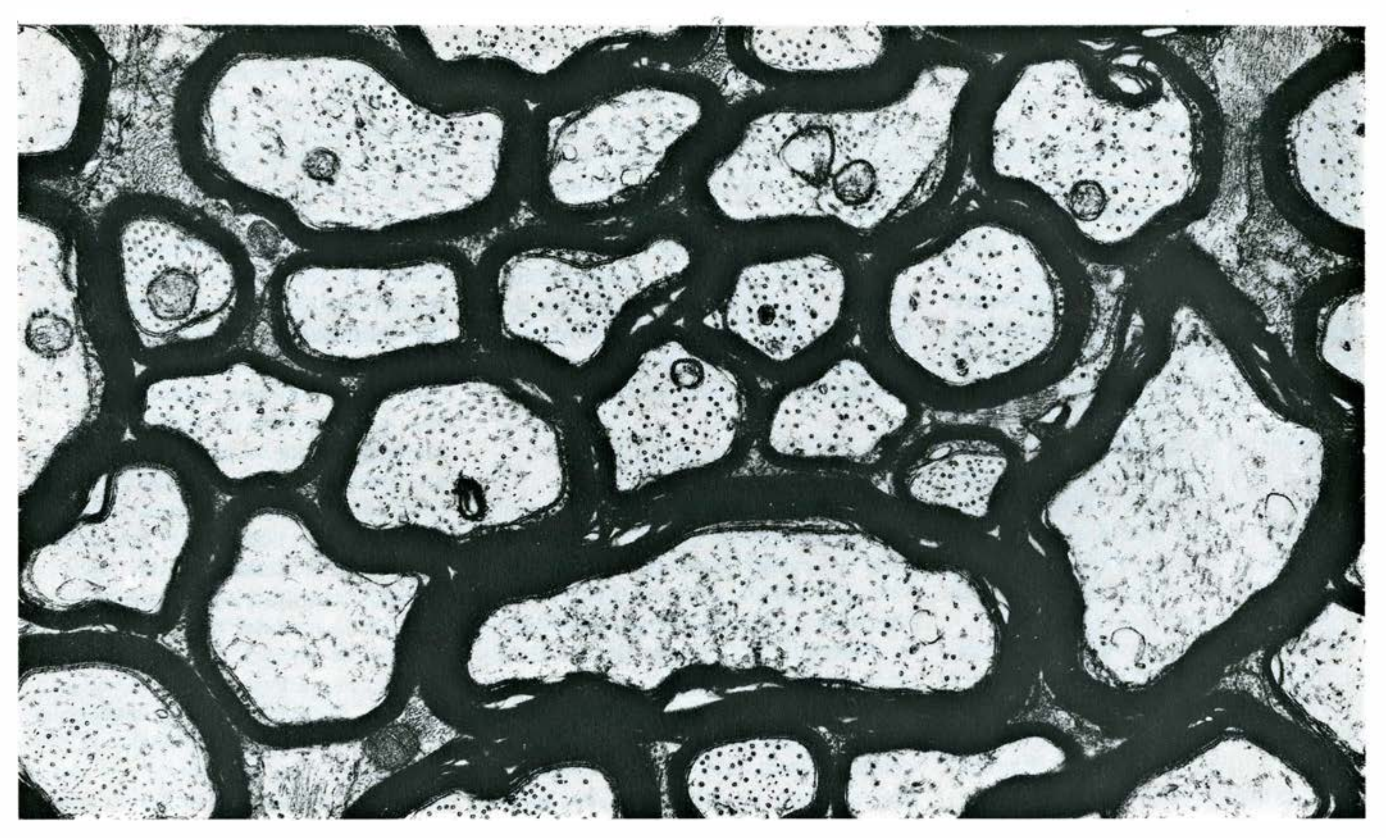
Conducción de impulsos en las neuronas

Que la mielina se comporta como un aislante eléctrico fue sugerido ya en 1878 por el patólogo francés Louis-Antoine Ranvier en un libro sobre anatomía del sistema nervioso, en el que establecía una analogía entre la mielina y la capa aislante de los cables telegráficos submarinos. Sin duda estuvo influido por el amplio interés suscitado en su época por los cables transatlánticos, el primero de los cuales se tendió en 1866.

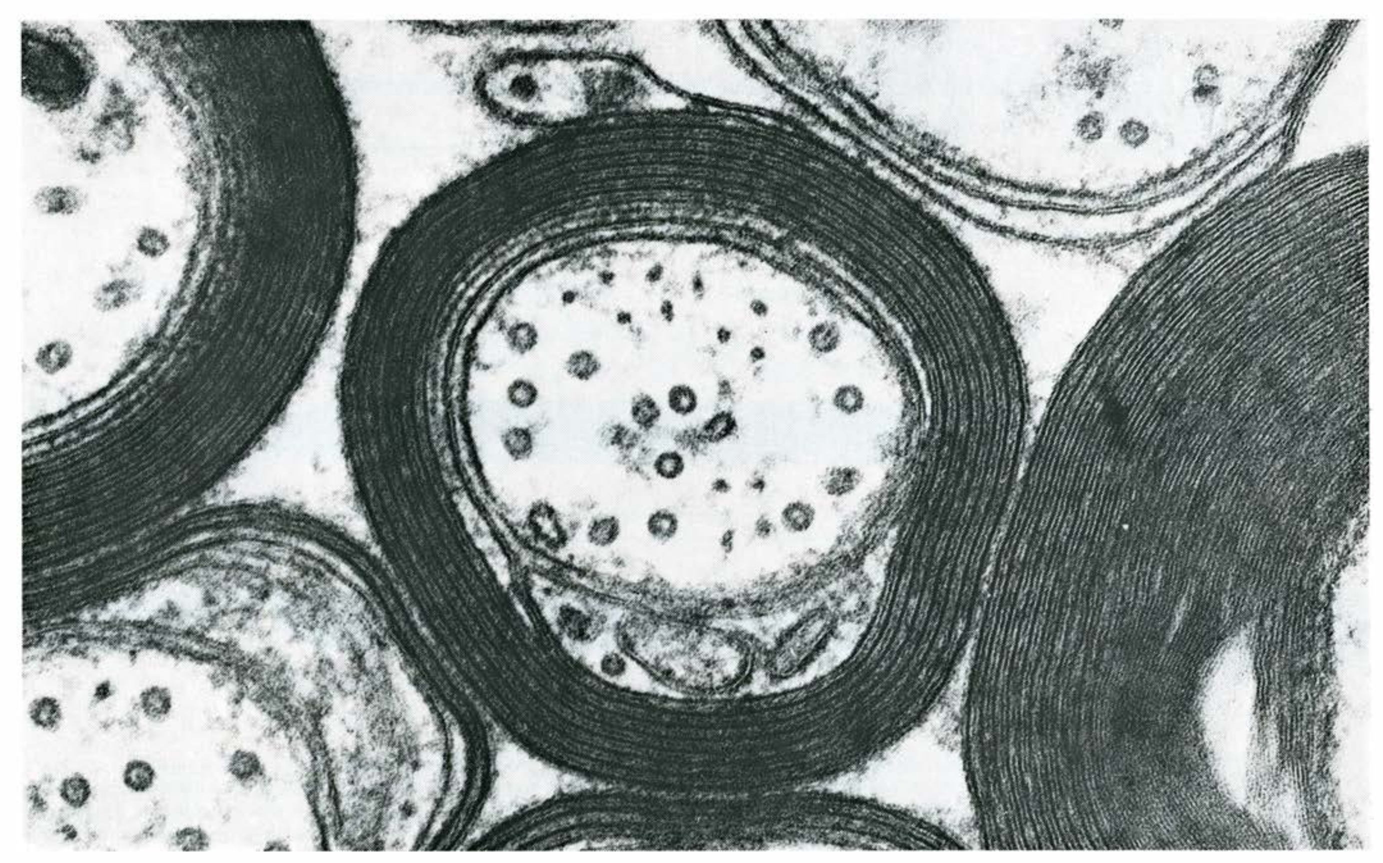
El mecanismo a través del cual la mielina favorece la conducción no guarda, sin embargo, una analogía exacta con los circuitos eléctricos. En primer lugar, una célula nerviosa consta de un cuerpo celular y varias prolongaciones o fibras. De ellas, el axón tiene la mayor longitud y conduce impulsos eléctricos que parten del cuerpo celular. Los axones pueden ser muy largos; así los axones de neuronas que controlan los músculos del pie parten de cuerpos celulares situados en la médula espinal.

La membrana que constituye la superficie de la neurona, axón y sus terminaciones incluidas, mantiene una diferencia de potencial entre el interior y el exterior de las células. El establecimiento de esta diferencia de potencial resulta posible gracias a la capacidad de la membrana para concentrar iones potasio en el interior de la célula mientras los iones sodio son expulsados al exterior. En ciertas condiciones se abren temporalmente determinados canales de la membrana que permiten la entrada de iones sodio y la salida ulterior de iones potasio, de forma que la diferencia de potencial cae y vuelve luego rápidamente a la normalidad. Cuando un área suficientemente extensa de la membrana resulta "despolarizada" del modo indicado, el cambio eléctrico puede propagarse a lo largo del axón. Esta es la señal nerviosa, a menudo denominada impulso nervioso.

En un axón amielínico el impulso nervioso se propaga mediante un flujo local y transitorio de iones. Una corriente eléctrica fluye desde la región despolarizada hacia las regiones adyacentes de la membrana. Estos circuitos locales despolarizan la membrana vecina de forma continua y secuencial, de suerte que el impulso nervioso se va propagando a través del axón a modo de onda. A ese mecanismo se le llama conducción continua. En la terminación del axón, la despolarización desencadena la liberación de un neurotransmisor, una sustancia que despolariza la membrana de la célula sobre la que actúa. Si el axón finaliza en un músculo, el neurotransmisor puede determinar la contracción muscular.



VAINAS DE MIELINA de las fibras nerviosas; aparecen al microscopio electrónico como gruesas capas de alta densidad que recubren el axón. Esta micrografía, como las del resto del artículo, ha sido realizada por Cedric S. Raine, de la Facultad de Medicina Albert Einstein de Nueva York. El tejido pertenece a la sustancia blanca y, si bien procede del nervio óptico de un cobayo, es típico de la sustancia blanca del sistema nervioso central (cerebro y médula espinal) de cualquier animal vertebrado. Contiene axones de distintos diámetros y vainas de diferente grosor. En general, los axones de mayor diámetro tienen vainas más gruesas. Los axones y sus vainas se encuentran en una matriz formada por las prolongaciones de unas células denominadas astrocitos. Una de estas prolongaciones se dirige hacia abajo en la parte superior derecha; otras han sido seccionadas transversalmente.



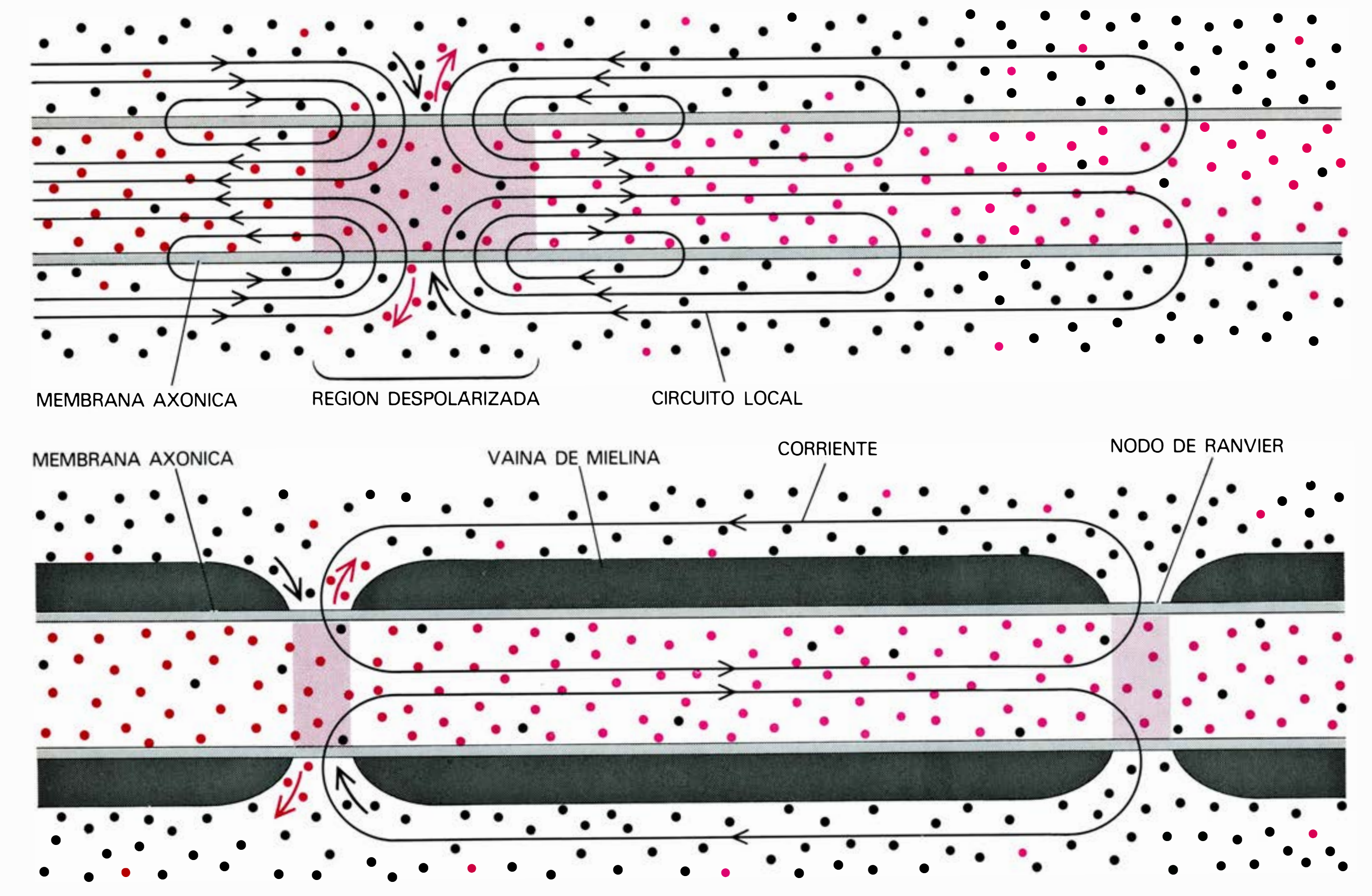
AXON INDIVIDUAL MIELINIZADO perteneciente al sistema nervioso central. La ampliación es de 150.000 diámetros. El comienzo de la vaina de mielina consiste, en su parte externa, en una masa de citoplasma, vista aquí en sección transversa. La célula que forma la vaina se compacta sobre sí misma y forma una doble capa de mielina que se enrolla alrededor del axón. La parte interior de la vaina está formada así mismo por citoplasma.

En un axón mielínico el proceso de conducción es diferente. En estos axones, la membrana queda expuesta al ambiente extracelular solamente en las interrupciones de la vaina de mielina denominadas nodos de Ranvier, en honor de quien las describiera en 1871. El resto de la membrana del axón, cubierto por la vaina de mielina, tiene una resistencia eléctrica mucho mayor y una capacitancia mucho menor que la membrana del axón. Cuando la membrana se despolariza en un nodo de Ranvier, el circuito local generado no puede fluir a través de la membrana adyacente y sólo se produce la excitación en el siguiente nodo de Ranvier. Puesto que la excitación de la membrana salta de nodo en nodo, la conducción del impulso nervioso es más rápida que en una fibra amielínica.

Además, en un axón provisto de mielina, basta un flujo discreto de iones sodio y potasio para despolarizar la pequeña superficie de membrana axónica expuesta a nivel del nodo de Ranvier. En consecuencia, sólo se utiliza una cantidad moderada de energía para bombear los iones sodio fuera del axón y los iones potasio hacia el interior y así mantener la polarización de reposo. En una fibra amielínica la totalidad de la membrana del axón debe despolarizarse y luego repolarizarse. Este es el motivo por el que la conducción del impulso por una fibra mielínica requiere menos energía. La forma de conducción a lo largo de una fibra mielínica recibe el nombre de conducción saltatoria, palabra derivada del latín *saltare*.

Estructura de la vaina

Las investigaciones sobre la estructura de la vaina de mielina se llevaron a cabo en primer lugar en aquellos nervios que, debido a su localización en el organismo, resultaban más accesibles a la disección. Los axones de un nervio están dispuestos en paralelo, como si formaran parte de un cable, de modo que el conjunto, vainas de mielina incluidas, ofrece una configuración bien determinada. La capacidad que tienen las fibras nerviosas de reorientar la luz polarizada, conocida desde el siglo pasado, se interpretó como una demostración de que las moléculas que constituían la mielina estaban dispuestas de forma altamente ordenada. En 1913 Gustav Göthlin probó que la reorientación se debía principalmente a la disposición de los lípidos, puesto que las propiedades ópticas de la mielina cambiaban drásticamente después de la extracción de dichas moléculas con alcohol. Los lípidos son una clase de compuestos, estructuralmente heterogéneos, caracterizados por su propiedad común de ser relativamente insolubles en el agua pero solubles en disolventes orgánicos tales como el alcohol y el benceno. La disposición ordenada de las proteínas también contribuía a las propiedades ópticas de la mielina. Otra técnica, la difracción de rayos X, fue utilizada a finales de los años 30 por Francis O. Schmitt, Richard S. Bear y colaboradores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, para determinar las distancias entre las capas moleculares repetitivas que constituían la mielina. Como re-



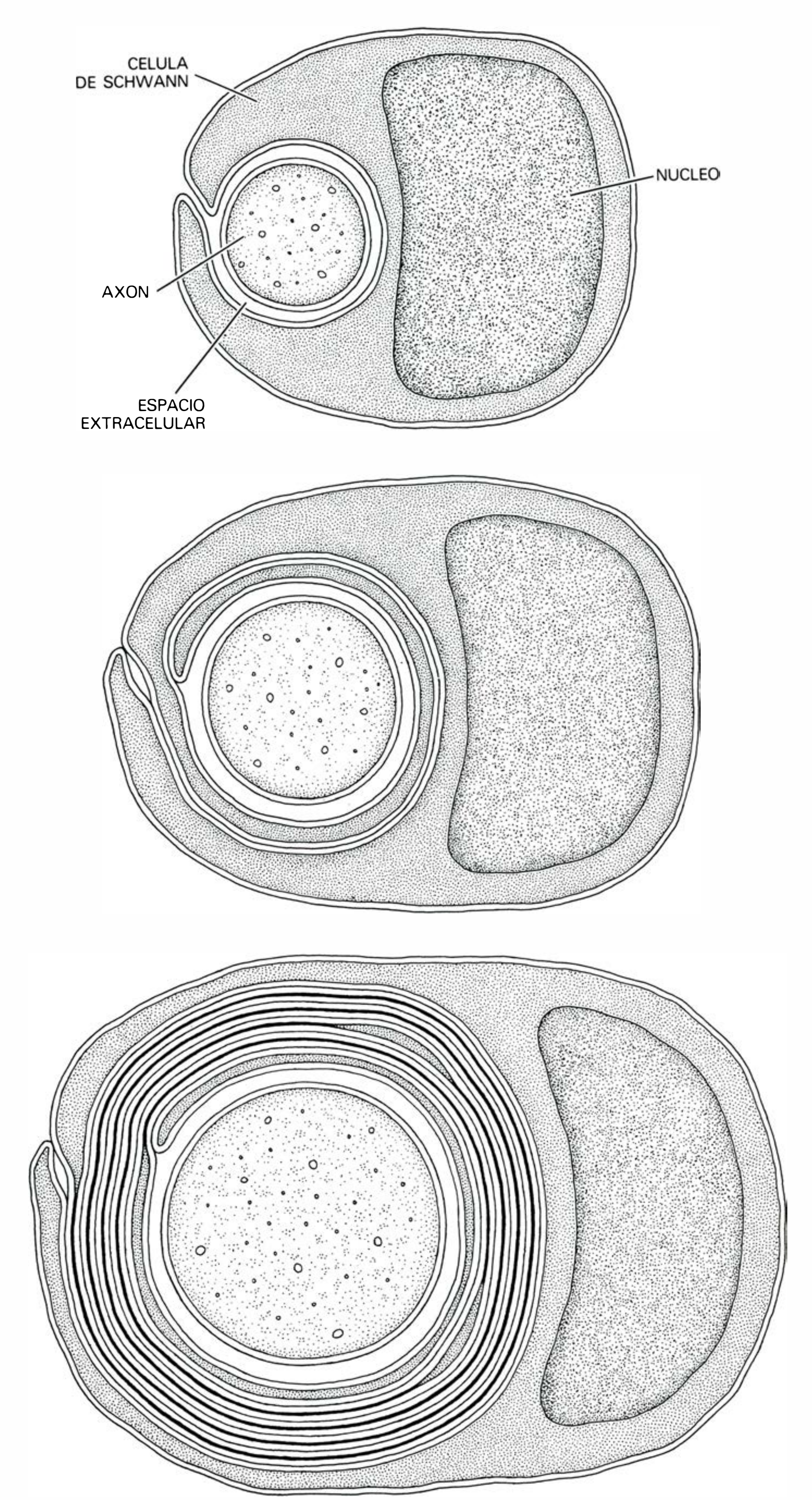
CONDUCCION DE UN IMPULSO o una señal eléctrica originada en una célula nerviosa. Aparece aquí esquematizada en una fibra nerviosa desnuda, desprovista de mielina (*arriba*), y en una fibra nerviosa recubierta de mielina (*abajo*). En ambos casos, el impulso consiste en una despolarización local transitoria: un cambio en la membrana de la fibra que determina la entrada en el axón de los iones sodio (*puntos negros*) y la salida de iones potasio (*puntos coloreados*). En la fibra amielínica se producen corrientes locales a consecuencia del flujo de iones que despolarizan las regiones vecinas, por lo que la conducción es continua. En la fibra mielínica, los iones fluyen hacia el interior o el exterior del axón, principalmente en los nodos de Ranvier, soluciones de continuidad de la vaina de mielina. El impulso eléctrico "salta" de nodo a nodo. Si un impulso se originara en la porción media del axón se propagaría a lo largo de la fibra en ambos sentidos a partir del punto de origen (posibilidad sugerida en la ilustración). Normalmente, el impulso nervioso se genera en el cuerpo celular y se propaga desde su origen hacia las terminaciones del axón. El esquema es de Tom Prentiss.

sultado de estos estudios fue propuesto un modelo según el cual la mielina era una estructura estratificada, formada por capas, presumiblemente de lípidos, cada una de 5,5 nanómetros de espesor, que alternaban con capas de unos 3 nanómetros de espesor que producían mayor difracción y que correspondían posiblemente a proteínas. Las capas proteicas eran a su vez de dos tipos distintos, uno más difractor que el otro, dispuestos alternativamente en el conjunto de la estructura estratificada. Por último, se postuló que cada capa lipídica era en realidad doble, con un espesor correspondiente a dos moléculas de lípidos.

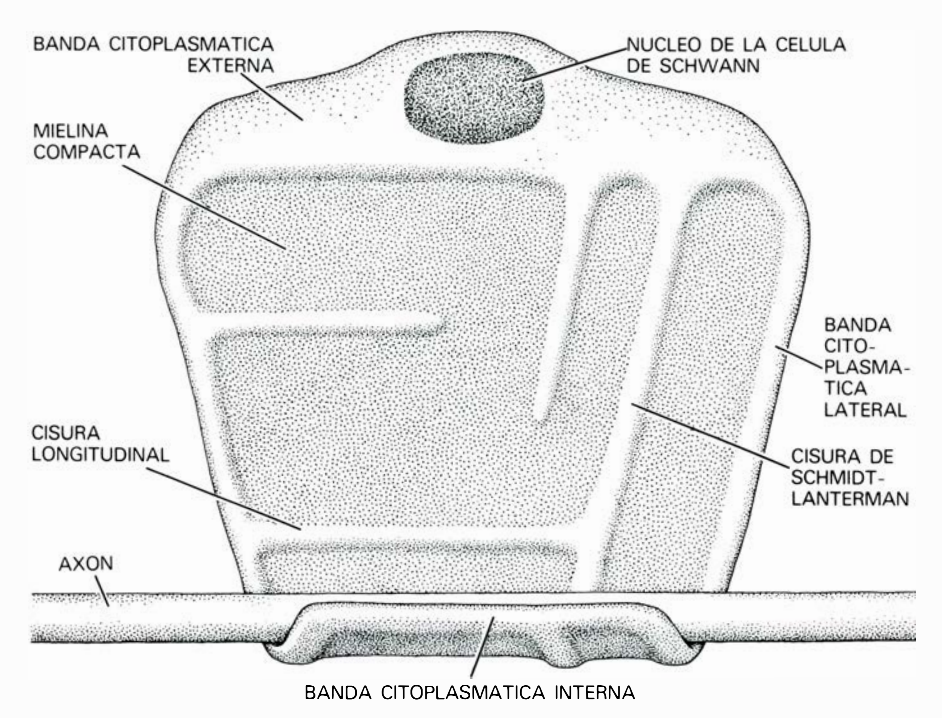
El modelo concuerda en muchos aspectos con el patrón estructural de la membrana celular de los mamíferos, que consta de una doble capa lipídica interpuesta entre dos superficies proteicas, una interna y otra externa. (La superficie interna limita con el citoplasma celular y la superficie externa está expuesta al medio extracelular.) La razón de tal similitud se puso de manifiesto en 1954, cuando Betty B. Geren, que trabajaba entonces en la Facultad de Medicina de Harvard, publicó micrografías electrónicas demostrativas de que en el sistema nervioso periférico la mielina no era un producto de la neurona con cuyo axón estaba íntimamente asociada. En realidad, la mielina no era un producto de las neuronas, sino que se desarrollaba a partir de la membrana de las denominadas células de Schwann.

La disposición en el sistema nervioso periférico se descifró poco después. Paralelamente al axón estaba dispuesta una hilera de células de Schwann; cada segmento de la vaina de mielina comprendido entre dos nodos de Ranvier pertenecía a una célula de Schwann distinta. La membrana de cada célula de Schwann se adosaba sobre sí misma para formar una capa delgada que envolvía repetidamente al axón. En consecuencia, cada estrato de la vaina de mielina estaba constituido por dos láminas de membrana celular. La presencia ocasional, en la vaina de mielina, del compartimiento citoplasmático, las denominadas cisuras de Schmidt-Lanterman, tenía la siguiente explicación: las cisuras eran restos de citoplasma que permanecían en áreas donde la compactación de la célula de Schwann y el adosamiento de la membrana celular no eran completos, quedando dichos espacios en comunicación con el cuerpo de la célula de Schwann.

El enrollamiento repetido de la membrana de la célula de Schwann alrededor del axón explicaba la estructura multiestratificada predicha por Schmitt, Bear y



VAINA DE MIELINA DE UN NERVIO, formada por una hilera de células denominadas células de Schwann, que se enrollan alrededor del axón. Aunque no se conocen los detalles de la formación de la vaina, hemos representado en esta serie de secciones transversales un posible mecanismo. El cuerpo de la célula de Schwann permanece estacionario, mientras que la membrana celular, adosada sobre sí misma, envuelve el axón. A medida que aparecen capas sucesivas y el axón aumenta de diámetro, la membrana de mielina se compacta. Cada célula de Schwann contribuye a un segmento de la vaina de mielina; las interrupciones entre segmentos constituyen los nodos de Ranvier. Sólo en su proximidad contacta la vaina con el axón; en el resto, se interpone una delgada capa de espacio extracelular.



LA VAINA DE MIELINA DESENROLLADA muestra los canales citoplasmáticos que permanecen en la célula de Schwann en aquellas regiones donde ésta no ha experimentado compactación sobre sí misma. Los canales comunican con el cuerpo celular y se denominan cisuras de Schmidt-Lanterman. Tales cisuras se encuentran siempre presentes en la mielina fuera del cerebro y de la médula espinal.

colaboradores. Así mismo daban razón a la alternancia de capas proteicas y el patrón de líneas claras y ocuras que forman anillos concéntricos alrededor del axón en las micrografías electrónicas de secciones transversales. Las líneas oscuras resultaban del contacto entre dos superficies internas de la membrana de la célula de Schwann cuando tiene lugar la compactación y se adosa la membrana sobre sí misma. Las caras internas de la membrana entran en un contacto tan íntimo que casi se fusionan. Las líneas más claras resultan de la superposición de la superficie externa de la membrana de la célula de Schwann, cuando ésta se enrolla sucesivamente alrededor del axón. Estas superficies también son proteicas pero no se asocian tan íntimamente, quizá por estar constituidas por proteínas distintas de las de la membrana interna. Por este motivo a menudo puede distinguirse una separación entre las líneas claras.

La estructura de la mielina en el sistema nervioso central, cerebro y médula espinal, no pudo descifrarse hasta más adelante debido a varias dificultades técnicas. Richard P. Bunge y colaboradores, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Columbia, partiendo de imágenes bidimensionales obtenidas con el microscopio electrónico dedujeron la arquitectura tridimensional de la mielina. La mielina del sistema nervioso central difiere en algunos aspectos de la mielina de los nervios periféricos. En particular las células que proporcionan la vaina de mielina en el sistema nervioso central pertenecen a la oligodendroglía. Se trata de una variedad de las denominadas células de la glía que son satélites de las neuronas. El cuerpo de cada célula de la oligodendroglía envía una serie de prolongaciones que envuelven a los axones adyacentes. Alan Peters, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Boston, puso de manifiesto que, en determinadas partes del sistema nervioso central, una célula de la oligodendroglía puede enviar un promedio de 40 prolongaciones. Es probable, no obstante, que, en un determinado axón, cada región internodal esté mielinizada por una célula de la oligodendroglía distinta.

Composición molecular

El dato más característico de la composición de la mielina respecto a la de otras membranas celulares (por ejemplo, la membrana de las células hepáticas) es su elevada proporción de lípidos comparada con su contenido en proteínas. Puesto que una elevada proporción de lípidos excluye el agua y los solutos hidrosolubles, entre ellos los iones sodio y potasio, el contenido lipídico de la mielina contribuye a su función aislante.

La elevada concentración de lípidos explica la menor densidad de la mielina respecto a otras membranas (por la misma razón que el aceite flota en el agua). Esta propiedad facilita el aislamiento de la mielina y hace posible estudios más detallados relativos a su composición. En una de las técnicas, que constituye una versión ampliamente utilizada de la desarrollada por uno de los autores (Norton) en colaboración con S. E. Poduslo, un homogeneizado cerebral se coloca sobre un gradiente de sacarosa en un tubo de centrífuga. Durante la centrifugación, cada uno de los componentes particulados del homogeneizado se distribuye en el gradiente de forma que su densidad corresponde a la de la región del gradiente en la que se localiza.

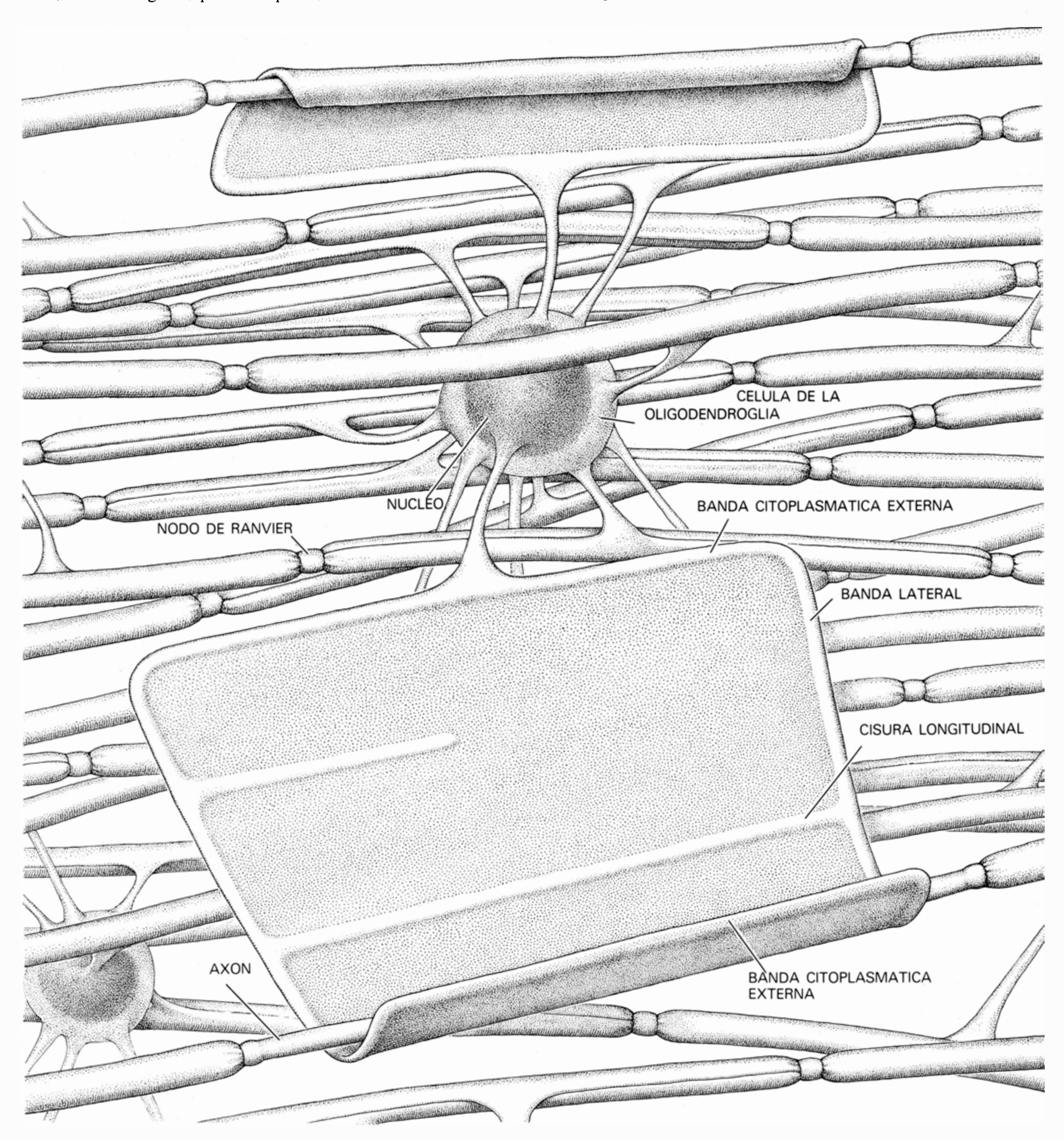
De esta forma, resulta posible obtener una fracción de la membrana que, al microscopio electrónico, parece consistir casi exclusivamente en partículas identificables como mielina, en virtud del patrón característico de líneas claras y oscuras. Los lípidos, que constituyen el 70 por ciento del peso seco de la mielina purificada del sistema nervioso central, pueden entonces aislarse y analizarse. Como en otras membranas, entre los lípidos se encuentra colesterol, fosfolípidos (un tipo muy común de lípidos caracterizados por poseer átomos de fósforo) y glicolípidos (un grupo muy diverso de lípidos que contienen cada uno de ellos una molécula de azúcar). Un glicolípido denominado cerebrósido, que contiene el azúcar galactosa, representa el 20 por ciento del peso seco de la mielina. Este lípido constituye el 6 por ciento del peso seco del cerebro humano. El cerebrósido no se encuentra prácticamente en ninguna otra región del cerebro salvo en la vaina de mielina.

El contenido proteico de la mielina es también característico. La mayoría de las membranas celulares están formadas por un conjunto heterogéneo de proteínas, ninguna de las cuales enmascara a las demás por encontrarse en exceso. La mielina, sin embargo, no sólo contiene una proporción mucho menor de proteínas en relación con otras membranas celulares, sino que su variedad es también menor. Entre las proteínas que faltan en la mielina cabe citar aquellas que facilitan el paso de iones a través de la doble capa lipídica; su ausencia explica la impermeabilidad a los iones característica de la vaina de mielina. Hay dos proteínas que predominan en la mielina. Una de ellas se denomina proteína básica de la mielina, por su solubilidad en medio ácido. Esta proteína representa un tercio del total de los componentes proteicos de la mielina. La otra proteína predominante fue identificada hace treinta años por Jordi Folch i Pi y Marjorie B. Lees, del Hospital McLean en

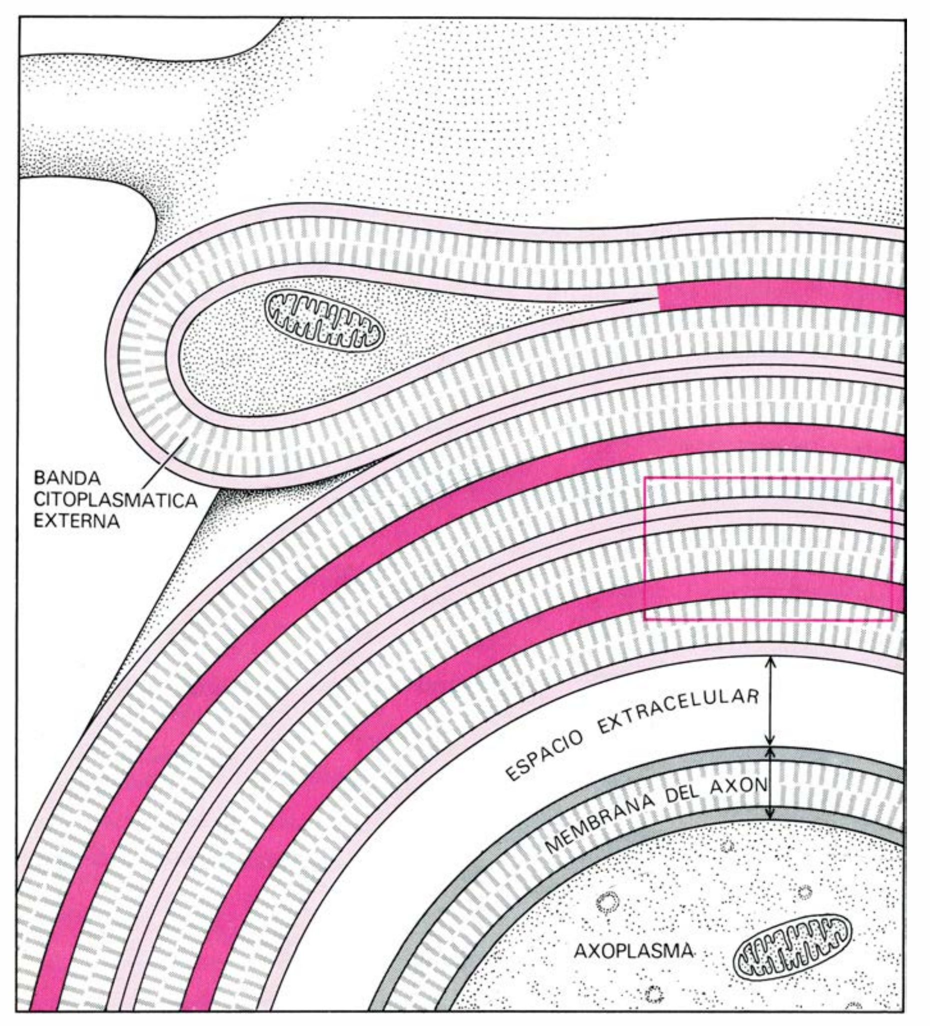
Belmont, estado de Massachusetts. Representa otro tercio o más del total de proteínas y tiene la propiedad poco común de ser soluble en disolventes orgánicos. Por gozar de esta propiedad típica de los lípidos recibe el nombre de proteolípido.

Se supone que tanto el proteolípido como la proteína básica de la mielina tienen funciones estructurales. El proteolípido organizaría la doble capa lipídica; ello lo sugiere, por una parte, su solubilidad en los disolventes lipofílicos y, por otra, la prueba indirecta de que el proteolípido se encuentra inmerso prácticamente en su totalidad en la doble capa lipídica de la mielina. La proteína básica podría estar implicada en la unión íntima de las superficies internas de la membrana que forman las líneas densas observadas en las micrografías electrónicas. Tal hipótesis se apoya también en la localización de la proteína; en efecto, una serie de investigaciones han demostrado que esta proteína está expuesta principalmente en la superficie interna de la membrana.

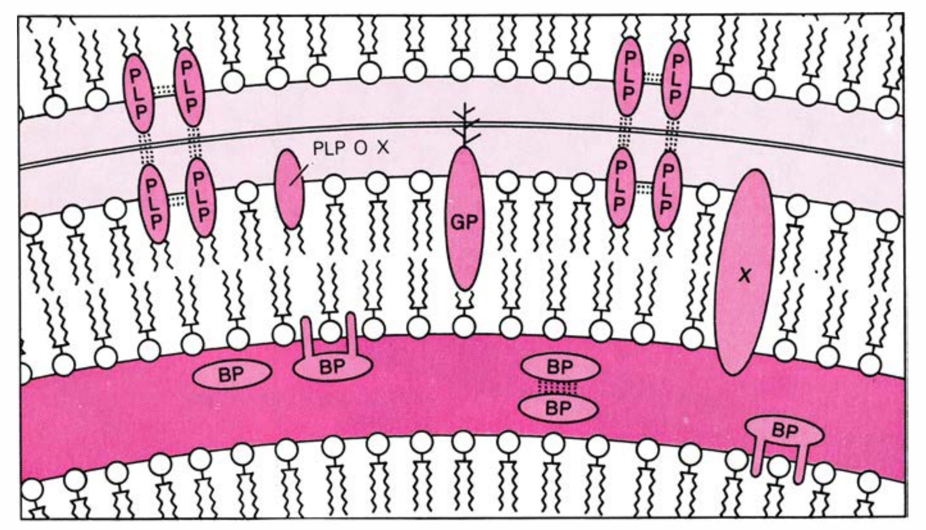
También se han aislado otras proteínas presentes en menor cantidad y algunas de ellas han sido parcialmente caracterizadas. Hay una que contiene azúcar, y recibe el nombre de glicoproteína de la mielina. Otras han sido identificadas como enzimas. Entre estas últimas, al-



VAINAS DE MIELINA DEL CEREBRO (o de la médula espinal): se generan por las denominadas células de la oligodendroglía. Dichas células mandan prolongaciones que se extienden formando láminas, parecidas a las velas de una embarcación, con las que envuelven a numerosos axones. Dos de las vainas se han representado parcialmente desenrolladas. El segmento de vaina representado en la parte inferior de la figura muestra los canales citoplasmáticos. Las cisuras de Schmidt-Lanterman no existen en el sistema nervioso central, que carece de igual modo de células de Schwann.



PATRONES DE LINEAS OSCURAS Y CLARAS de las micrografías electrónicas de las vainas de mielina; tales diseños pueden explicarse por la estructura molecular de la membrana y por su manera de rodear el axón. En la parte superior de la ilustración, las superficies internas de la membrana de una célula de la oligodendroglía se adhieren para formar una doble capa que da vueltas repetidamente alrededor del axón. Cuando las superficies internas de la membrana (que limitan con el citoplasma de la célula formadora de mielina) se adhieren, lo hacen tan íntimamente que casi se fusionan y forman la línea oscura. Las superficies externas de la membrana, que entran en contacto en los sucesivos estratos, no se adhieren tan firmemente y dan lugar a las líneas claras. Entre ambas, hay capas lipídicas.



VISION MAS DETALLADA de la membrana de mielina del sistema nervioso central en la que se han representado las posiciones hipotéticas de varias proteínas. El esquema, una adaptación de la ilustración realizada por Peter E. Braun, de la Universidad McGill, corresponde al área incluida en el rectángulo de la figura superior. La proteína básica (*BP*) constituye las líneas oscuras que aparecen en las micrografías electrónicas de la vaina de mielina. El proteolípido (*PLP*) se encuentra en las líneas claras y se proyecta en las capas lipídicas. La glicoproteína (*GP*) está presente asimismo en las líneas claras. Otras proteínas (*denominadas X*) aún no han sido identificadas; algunas de ellas son enzimas. La capa lipídica es, en realidad, una bicapa, es decir, tiene un grosor correspondiente a dos moléculas.

gunas catalizan la síntesis y degradación de los lípidos de la mielina. Probablemente son necesarias para la formación y el recambio metabólico de los componentes de la membrana, aspecto que será considerado ulteriormente. La presencia de otros enzimas es difícil de explicar. Un ejemplo lo constituye la anhidrasa carbónica, enzima que cataliza la interconversión del anhídrido carbónico y el ácido carbónico. Su presencia sugiere que la mielina, además de su función de aislante eléctrico, podría desempeñar un papel activo aún desconocido facilitando la función nerviosa.

Aunque la mielina del sistema nervioso periférico tiene una concentración de lípidos (alrededor del 80 por ciento) incluso superior a la del sistema nervioso central, la proporción de los distintos lípidos es similar. En el sistema nervioso periférico, sin embargo, una sola proteína denominada P_0 representa el 55 por ciento de todas las proteínas de la mielina. Otras proteínas caracterizadas en la mielina del sistema nervioso periférico son la proteína P_1 (indéntica quizás a la proteína básica del sistema nervioso central, aunque presente en pequeñas cantidades en el sistema nervioso periférico) y la P_2 (proteína básica característica del sistema nervioso periférico).

Formación de la vaina

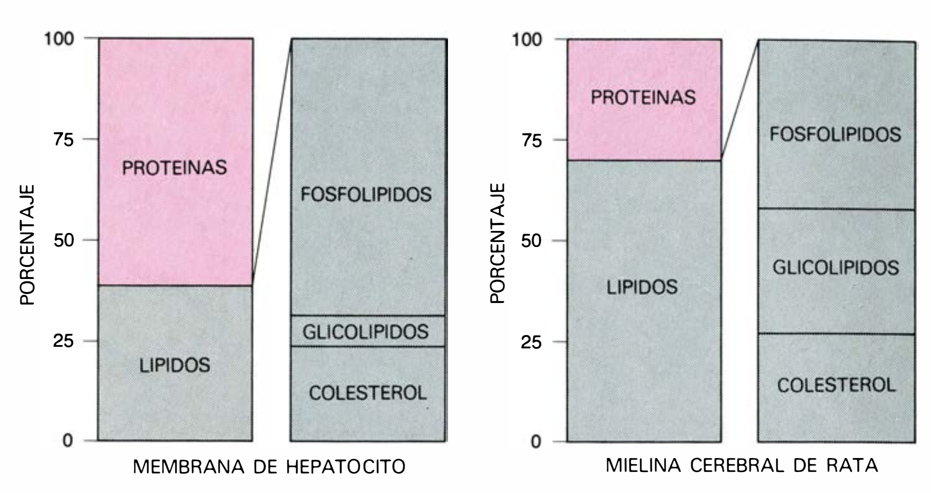
En el sistema nervioso periférico de un niño el recubrimiento de los axones por la vaina de mielina se completa antes del nacimiento, aunque la mielinización continúa durante la infancia para revestir la superficie de los nervios que crecen en proporción al resto del organismo. Sin embargo, la mielinización del cerebro humano y de la médula espinal dista mucho de ser completa en el momento del nacimiento. La mielinización ocurre en momentos distintos en diferentes regiones del sistema nervioso central. Se desconocen los pormenores del mecanismo a través del cual un axón transmite a la célula de la oligodendroglía la información de que ya se encuentra en condiciones de ser mielinizado. Muy recientemente, sin embargo, Nancy Sternberger, Richard H. Quarles, Henry DeForest Webster y colaboradores, del Instituto Nacional de Alteraciones Neurológicas, de Comunicación y Apoplejía, han demostrado que, cuando tiene lugar la mielinización, la glicoproteína mencionada anteriormente se concentra en el lugar de contacto entre un axón y la expansión de la membrana de la célula de la oligodendroglía. Una hipótesis lógica es que la glicoproteína intervenga de algún modo en el reconocimiento entre ambas estructuras.

Después del reconocimiento tiene lugar un rápido acúmulo de mielina alrededor del axón. La mayoría de la mielina se deposita en una determinada región cerebral en el curso de varios meses. Durante este período, el cuerpo de una célula de la oligodendrología debe sintetizar una cantidad de mielina al día equivalente a varias veces su propia masa. Una importante deficiencia en la alimentación global o la carencia de ciertos nutrientes críticos como los aminoácidos esenciales (aquellas unidades constitutivas de las proteínas que no pueden ser sintetizadas en el organismo y deben ser aportadas en la dieta) son responsables de que las células de la oligodendroglia no puedan llevar a cabo sus funciones metabólicas. Este déficit metabólico puede ser consecuencia de la malnutrición (inanición severa o dieta muy desequilibrada) o producirse secundariamente a enfermedades que interfieren con la ingesta o absorción de alimentos o con la síntesis de proteínas o lípidos en las células formadoras de mielina.

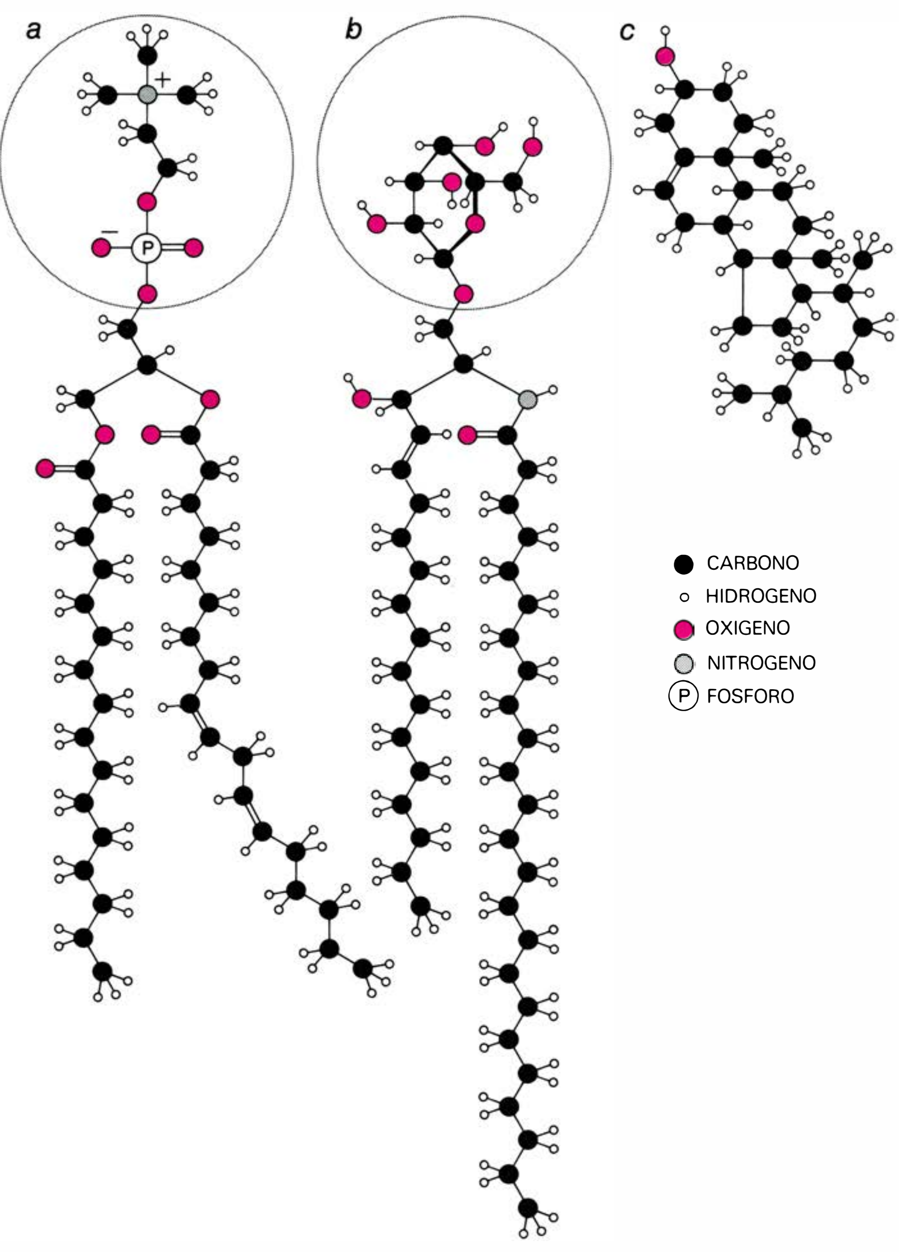
En cualquier caso, las alteraciones metabólicas importantes durante la infancia pueden dar lugar a un déficit de producción de mielina en el momento adecuado dentro de la compleja secuencia de acontecimientos que supone el desarrollo cerebral. Aunque es posible cierta recuperación ulterior, en casos graves se produce un déficit permanente. Actualmente resulta imposible distinguir las consecuencias de una mielinización inadecuada de otros efectos de la desnutrición, pero es indudable que no resulta beneficiosa. Debe hacerse énfasis en la diferente situación de un organismo en desarrollo y una vez ha alcanzado la madurez. Los animales adultos desnutridos no experimentan pérdidas importantes de ningún componente cerebral.

En relación con el crecimiento real de la vaina de mielina, resulta interesante considerar brevemente algo de lo que ya sabemos a propósito de la síntesis de la membrana celular en otras células menos especializadas de diversos órganos. En el interior de la célula, los lípidos y la mayoría de las proteínas que componen la membrana se sintetizan y forman una vesícula que se funde ulteriormente con la membrana celular, entrando a formar parte de la misma. A continuación se incorporan otras proteínas, especialmente las expuestas en la cara interna de la membrana.

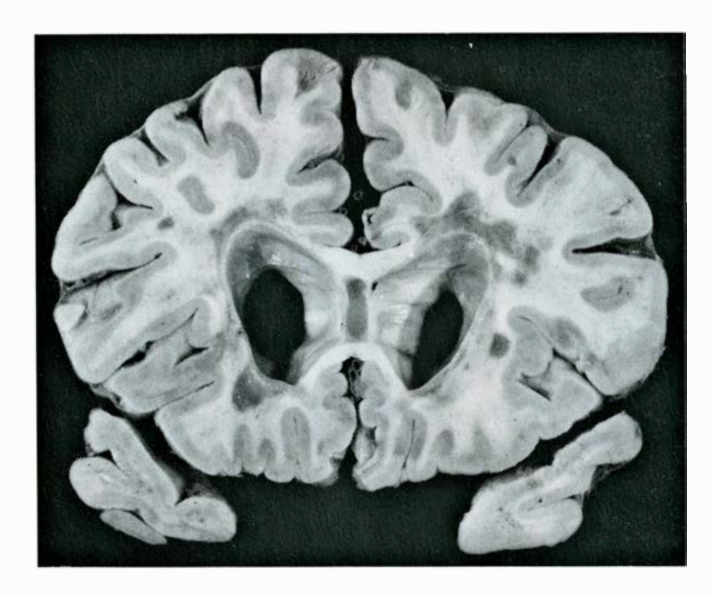
El punto crucial lo constituye el hecho de que, en la mayoría de los tipos celulares, la membrana de la vesícula precursora parece distribuirse al azar en la membrana celular en desarrollo. Sin

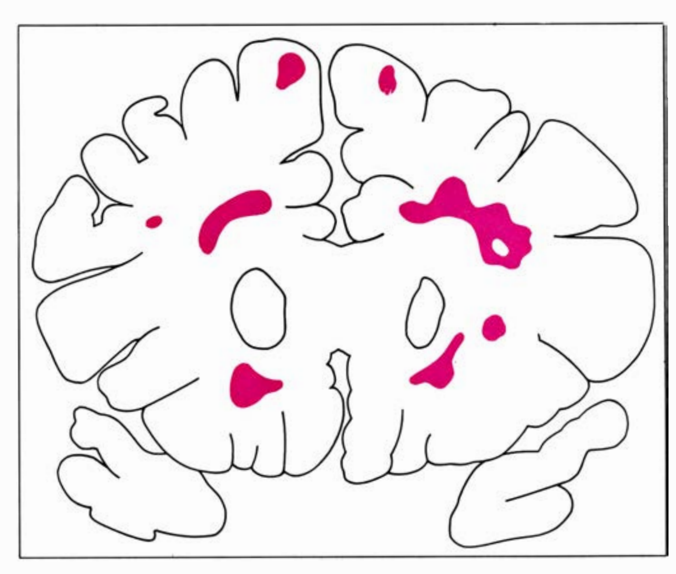


COMPOSICION MOLECULAR DE LA MIELINA comparada con la de una típica membrana celular. Los datos se expresan en tantos por ciento en peso. La membrana celular corresponde a una célula hepática de rata y la mielina al cerebro de rata. En esta última los lípidos predominan sobre el componente proteico. Existen tres tipos de lípidos distintos, representados en la ilustración inferior.



TRES LIPIDOS DE LA MIELINA representantes de las tres clases de lípidos indicadas en la gráfica de la figura superior. La fosfatidilcolina (*a*) es un fosfolípido es decir, un lípido con átomos de fósforo. El cerebrósido (*b*) es un glicolípido, molécula que contiene azúcar, en este caso galactosa, en su estructura. Un doble enlace entre los átomos de carbono incurva la cola de la fosfatidilcolina. Las colas de los glicolípidos no contienen habitualmente dobles enlaces. La tercera molécula (*c*) es el colesterol.





CEREBRO de un hombre de 60 años de edad que falleció víctima de la esclerosis múltiple. Esta enfermedad de la mielina muestra lesiones visibles, incluso en una sección sin teñir, 14 años después de haber sido diagnosticada. Las dos cavidades de gran tamaño más o menos simétricas que aparecen en la sección son los ventrículos laterales; la sustancia blanca que las rodea muestra falta de coloración en regiones donde los axones han perdido la vaina de mielina. Otras regiones similares, denominadas placas, están diseminadas por toda la sustancia blanca. En el diagrama de la derecha se muestran las localizaciones de las placas. La fotografía es de Cedric S. Raine y Dikran S. Horoupian, de la Facultad de Medicina Albert Einstein.

embargo, la membrana de mielina debe formarse con cierta polaridad, pues crece a partir del cuerpo celular en una dirección determinada.

¿Dónde se incorpora la nueva mielina sintetizada? ¿Cerca del cuerpo celular, en el límite de la vaina en desarrollo, o bien al azar, formando parches? Los datos disponibles apoyan la primera posibilidad. Robert M. Gould, del Instituto de Investigación Básica del Retraso Mental, ha realizado experimentos en los que ha podido seguirse con el microscopio electrónico la incorporación de precursores marcados radiactivamente en la vaina de mielina en desarrollo del nervio ciático, un nervio que inerva tejidos de la extremidad inferior. Cuando la sustancia marcada es la proteína P_0 de la mielina, la radiactividad aparece en primer lugar en el citoplasma de la célula de Schwann, luego en una región de la membrana próxima a la zona de mielina en crecimiento y finalmente en la envoltura más externa de la vaina de mielina en desarrollo. Varios días después, la banda de radiactividad queda cubierta por las sucesivas capas de mielina.

Estas investigaciones no aportan datos sobre la forma precisa de disponerse la mielina alrededor del axón. ¿Se deposita mielina merced a un movimiento de la célula que la sintetiza alrededor del axón (la célula dejaría una banda de mielina en su movimiento envolvente), o bien es propulsada desde la célula mientras ésta se mantiene estacionaria y la porción más alejada de la vaina se enrolla alrededor del axón? Debe tenerse en cuenta que, en el sistema nervioso central, una célula de la oligodendroglía posee unas limitaciones que no se dan en la célula de Schwann. A medida que la lengua de mielina se extiende dando vueltas alrededor del axón, la célula de Schwann de donde procede puede desplazarse, proporcionando la adecuada libertad de movimiento a la vaina. Una célula de la oligodendroglía, sin embargo, está anclada por las múltiples extensiones que la conectan con distintos axones. Parece, pues, imposible que en el sistema nervioso central la mielina se deposite por un cuerpo celular que gira alrededor del axón. En este caso, la mielina recién formada propulsaría las capas ya existentes y en un movimiento en espiral haría avanzar el extremo de la vaina. El mecanismo que utilizan las células inmóviles de la oligodendroglía para evitar que se desarrolle tensión durante el movimiento envolvente de la vaina pone a prueba el ingenio de los microscopistas electrónicos.

Reemplazamiento de moléculas

Se plantea la cuestión de si en la vaina de mielina ya formada existe una renovación de las proteínas y los lípidos, tal como ocurre en otras membranas celulares. Podemos determinar la tasa o velocidad de reemplazamiento de un componente de la membrana utilizando un precursor marcado radiactivamente, que se coloca en la proximidad de la célula para que pueda ser captado. Suele recurrirse a un aminoácido marcado que se incorpora a las proteínas o glucosa radiactiva; al metabolizarse, sus productos se incorporan en los lípidos. Consideremos un constituyente de la mielina marcado de la forma indicada. Se incorpora a la membrana en un período de tiempo que oscila entre minutos y horas. La radiactividad total de la membrana disminuye con el tiempo al ser reemplazadas las moléculas de la membrana por nuevos componentes no radiactivos. Cuando la radiactividad ha descendido a la mitad, la mitad de las moléculas han sido reemplazadas; este tiempo se denomina vida media metabólica del lípido o la proteína en cuestión.

Los cálculos reales son más complicados, puesto que deben corregirse los incrementos de la cantidad global de membrana que tienen lugar durante el crecimiento. Además, parte del recambio puede realizarse a partir de fragmentos de membrana que forman vesículas y vuelven al citoplasma de la célula para ser sustituidos por membrana recién formada. Pueden volver a utilizarse muchos componentes de la membrana vieja. Gracias a las investigaciones llevadas a cabo en distintos grupos (entre ellos el laboratorio de Marion E. Smith, en la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, y en el laboratorio de uno de los autores, Morell, en la Facultad de Medicina de la Universidad de Carolina del Norte) se sabe actualmente que los componentes de la mielina experimentan recambio metabólico, aunque más lento que el de los componentes de otras membranas del cerebro. Esta mayor estabilidad metabólica fue propuesta originalmente por Alan Davison, del Instituto de Neurología de la Universidad de Londres. La mayoría de los lípidos que forman parte de la mielina tienen vidas medias de varias semanas. En algunos de ellos, los cerebrósidos, su

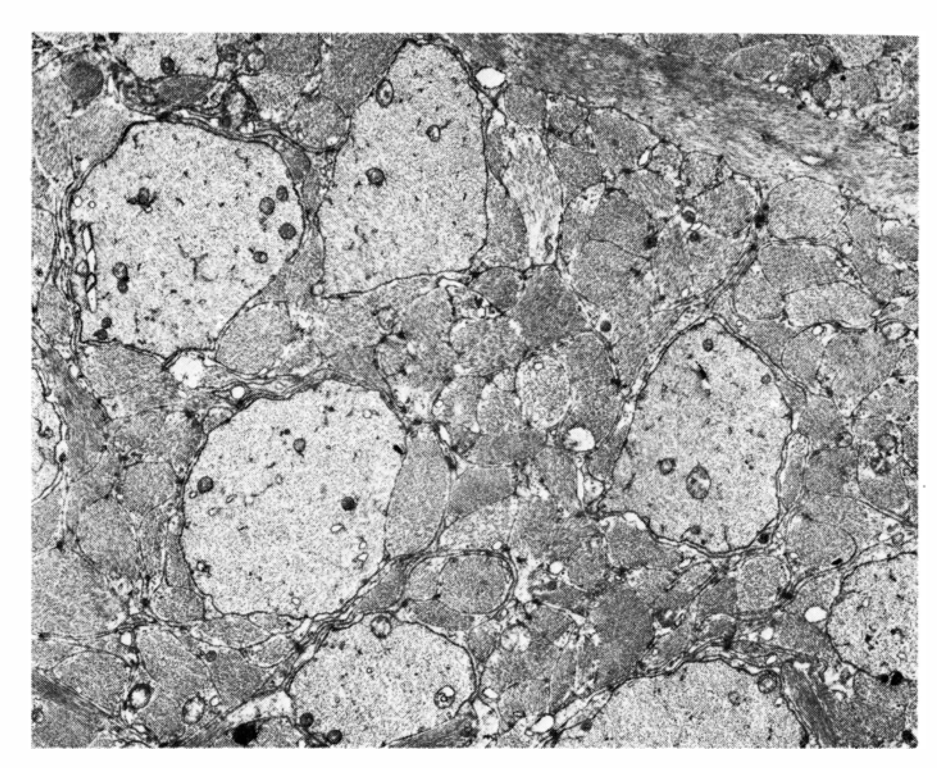
vida media alcanza varios meses. El recambio metabólico de las proteínas de la mielina es también muy lento: para la proteína básica y el proteolípido la vida media dura varios meses. Hay que advertir que estos resultados fueron obtenidos en animales de experimentación, generalmente en ratas. El recambio de mielina en el sistema nervioso humano puede ser aún más lento.

Uno se pregunta cómo las moléculas de la mielina pueden metabolizarse, teniendo en cuenta el grado de compactación de los distintos estratos. A través de las micrografías electrónicas no resulta fácil hacerse cargo del mecanismo por el cual la parte de mielina compactada puede establecer comunicación con el citoplasma de la célula formadora de mielina. Tampoco puede eliminarse la membrana hacia el exterior de la célula. Ocasionalmente se observan en las secciones transversales de la vaina de mielina canales de citoplasma que parten del cuerpo celular y penetran en las regiones compactas. Quizás estas partes del citoplasma contengan la maquinaria molecular necesaria para metabolizar los constituyentes de la mielina. Si este dedo citoplasmático no permanece fijo en el espacio y el tiempo (a diferencia de lo que ocurre en la preparación fijada para microscopía electrónica) sino que se trata de una estructura dinámica que se desplaza continuamente, tal compartimento podría llevar a cabo el recambio metabólico de los componentes de la membrana.

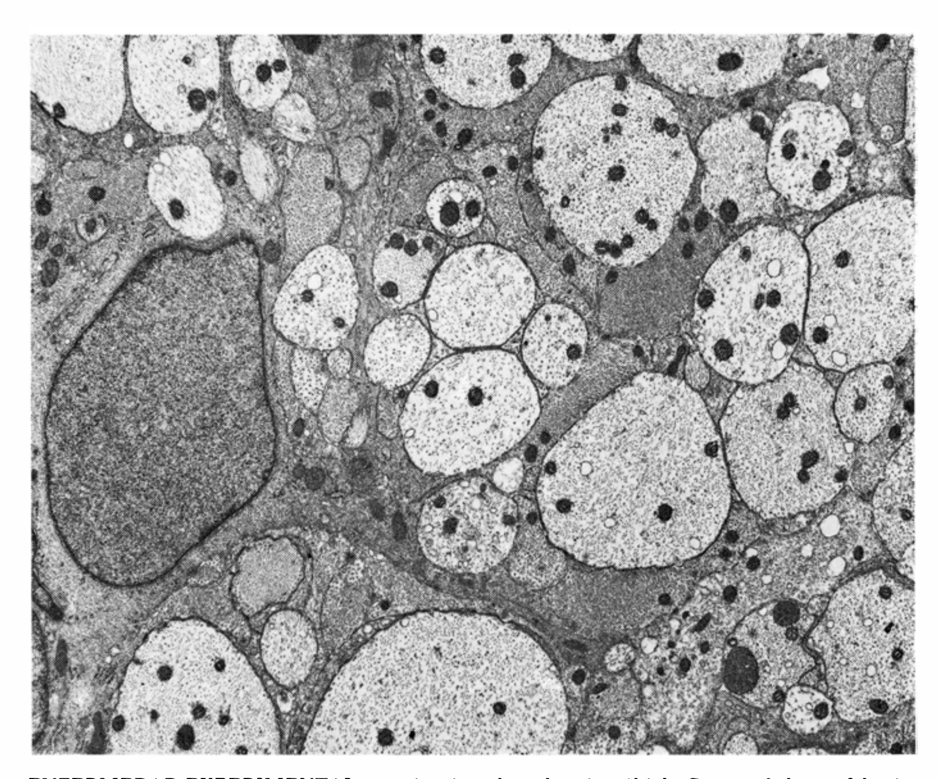
Otra posibilidad relacionada con la anterior consistiría en que los componentes de la membrana de mielina difundieran hacia el lado externo de la vaina, donde la compactación de la membrana es incompleta y se forma un canal citoplasmático que constituye la banda lateral. Cabe que los componentes lipídicos de la vaina difundan más fácilmente que los proteicos. Estos últimos se hallarían anclados en una estructura que limitaría su movilidad. Bajo este punto de vista, las menores velocidades de recambio metabólico de ciertos lípidos estarían relacionadas con una unión más fuerte a las proteínas.

Esclerosis múltiple

La mielina facilita la conducción del impulso nervioso. Por ello es de esperar que la pérdida de la vaina de mielina o sus alteraciones repercuta en las funciones del sistema nervioso. Y así ocurre, sobre todo, en el central, donde las células de la oligodendroglía no se regeneran después de una lesión. Por contra, las alteraciones de las células de Schwann suelen ser reversibles, habida cuenta de



REGION LESIONADA de la sustancia blanca tal como se observa en una micrografía electrónica de la médula espinal de un paciente que murió 20 años después de ser diagnosticada la esclerosis múltiple. En la sección transversal de la placa se observan cinco axones y partes de algunos otros. Los axones han perdido la vaina de mielina y están inmersos en una matriz anormal constituida por prolongaciones de astrocitos que producen el endurecimiento (esclerosis de la placa). Una de estas prolongaciones cruza en diagonal el vértice superior derecho, otras aparecen en sección transversal. El punteado de las prolongaciones corresponde a filamentos seccionados transversalmente. Su densidad es anormalmente alta en comparación con la densidad propia del tejido normal (*véase la ilustración superior de la página 53*).



ENFERMEDAD EXPERIMENTAL que mimetiza a la esclerosis múltiple. Se trata de la encefalomielitis alérgica experimental. Al igual que en la esclerosis múltiple, en la forma crónica de la enfermedad los axones pierden su vaina de mielina y se encuentran inmersos en una matriz anómala de astrocitos. El núcleo de una de estas células aparece a la izquierda. El tejido fue obtenido de la médula espinal de un cobayo que recibió una única inyección subcutánea de sustancia blanca emulsionada, desarrollando, en consecuencia, una reacción inmunitaria frente a la mielina de su propio sistema nervioso. La inyección incluía, además, como adyuvante, una preparación de membrana bacteriana que constituyó un estímulo inespecífico del sistema inmunitario. Ocho semanas después de la inyección apareció parálisis, el animal se recuperó parcialmente y recayó luego de forma más severa siendo sacrificado 16 semanas después de la inyección. La ampliación, como en la figura superior, es de 8000 diámetros.

la capacidad de regeneración de estas células.

No es fácil determinar el papel que juega la alteración de la mielina en el déficit funcional debido a que, en muchas enfermedades de la mielina, se produce también lesión neuronal. De hecho, la muerte o la lesión grave de las neuronas acarrean la aparición de alteraciones de la mielina y la muerte de las células de la oligodendroglía, hablándose en este caso de desmielinización secundaria, puesto que la lesión neuronal es el hecho primario. En otros casos, la alteración primaria ocurre en la vaina de mielina o en las células de la oligodendroglía. Vamos a considerar el caso de una lesión de las células formadoras de mielina en que se mantienen intactas durante largos periodos de tiempo las células nerviosas y sus axones.

Uno de los ejemplos mejor conocidos de enfermedades en las que se destruye la mielina pero se mantienen las células nerviosas es la esclerosis múltiple. En los Estados Unidos esta enfermedad, bastante común, afecta a unas 250.000 personas. Se diagnostica en adultos jóvenes entre los 20 y los 40 años de edad. La incidencia es mayor en mujeres que en hombres. Los síntomas varían; unas veces se trata de dificultad en la visión, debilidad muscular, falta de coordinación y espasticidad. Todos estos síntomas denotan alteraciones en la función del sistema nervioso. Los síntomas pueden desaparecer o disminuir de intensidad o, por el contrario, experimentar exacerbaciones. El curso habitual es cíclico, con un aumento progresivo de la incapacidad, aunque la variabilidad es grande. Por este motivo la esclerosis múltiple es difícil de diagnosticar en sus estadios iniciales.

Los síntomas de la esclerosis múltiple se producen por el desarrollo de múltiples placas escleróticas (semejantes a cicatrices) en la sustancia blanca del sistema nervioso central. Tales placas se aprecian incluso a simple vista en la autopsia. Al microscopio las placas aparecen desprovistas de mielina y de células de la oligodendroglía, pero los axones tienen un aspecto prácticamente normal. La mielina y las células de la oligodendroglía son reemplazadas por células denominadas astrocitos reactivos, que forman una intrincada matriz compacta. Alrededor de los bordes de cada placa hay macrófagos y linfocitos (glóbulos blancos sanguíneos que destruyen material extraño). En las placas en actividad, donde la destrucción de la mielina aún progresa, los macrófagos tienen residuos de mielina en su interior. Stephen Cohen, Robert M. Herndon y Guy M. McKhann, trabajando conjuntamente en la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, y John Whitaker, de la Universidad de Tennessee, han observado recientemente que las exacerbaciones de la enfermedad se acompañan de un incremento de la proteína básica en el líquido cefalorraquídeo que rodea al cerebro y la médula espinal. Esta observación confirma la relación propuesta entre los síntomas de la enfermedad y la destrucción de la mielina.

La mayoría de los investigadores consideran que los síntomas de la esclerosis múltiple pueden atribuirse a defectos de conducción de los impulsos nerviosos a través de los axones de las placas desprovistos de la capa aislante de mielina. De hecho, tales axones, al parecer, no conducen los impulsos en absoluto. Se ha especulado, y hay ciertas pruebas de ello, que un axón que ha experimentado una pérdida parcial de mielina cambiaría al cabo de un tiempo las propiedades de su membrana desmielinizada, siendo capaz de conducir lentamente por el mecanismo de conducción continua. (Algunos axones normalmente amielínicos transmiten los impulsos únicamente por el sistema de conducción continua.) La recuperación de la conducción lenta podría explicar la remisión de algunos síntomas de la esclerosis múltiple.



MIELINA DEVORADA por un macrófago, un glóbulo blanco de la sangre, en el sistema nervioso de un conejo que desarrolló una encefalomielitis alérgica experimental a raíz de una inyección de sustancia blanca y adyuvante. En el conejo la enfermedad es grave: consta de un único episodio de autoinmunorreacción. A la izquierda, los pseudópodos del macrófago van levantando capas de la mielina de un axón. El citoplasma del axón aparece en la parte inferior izquierda, debajo de los restos de la vaina. Un fragmento de mielina de considerable tamaño, recién arrancado de la vaina, se aprecia arriba, a la izquierda del núcleo del macrófago. Otro queda a la derecha del núcleo. El aumento de la micrografía es de 25.000 diámetros.

Otro posible mecanismo de recuperación funcional parcial es la existencia de una cierta remielinización. Esta puede llevarse a cabo mediante la síntesis de mielina por células de la oligodendroglía no dañadas. Las células de la oligodendroglía no pueden regenerarse, por lo que no pueden remielinizar las placas de un cierto tamaño. En aquellas placas situadas en la médula espinal no muy lejos de un nervio se ha observado remielinización por células de Schwann que penetran en la médula desde el sistema nervioso periférico. ¿Sería posible estimular a las células de Schwann para provocar su migración hacia placas situadas en la médula espinal o en el cerebro? Actualmente apenas sabemos nada sobre el mecanismo de migración de estas células ni tenemos certeza de que los axones, una vez remielinizados, consigan la recuperación funcional.

Aunque la causa de la esclerosis múltiple es oscura, existen varias hipótesis plausibles. Algunos datos sugieren que se trataría de una infección vírica. Otras observaciones muestran que la enfermedad tiene una mayor incidencia en personas con predisposición genética. La mayoría de los inmunólogos consideran que estas lesiones del sistema nervioso son una consecuencia de una reacción de inmunidad celular en la que el organismo destruye su propio tejido. Una hipótesis ecléctica incluye los tres factores. Tal hipótesis supone que un virus infecta al cerebro en una edad temprana y que la susceptibilidad al virus está determinada por la predisposición genética. Los linfocitos y los macrófagos invaden el cerebro y, al acabar con el virus, destruyen también la mielina. Otra posibilidad consiste en que las proteínas cerebrales, incluyendo las de la mielina, resulten liberadas por la infección vírica o por la reacción inmunológica al virus y alcancen la circulación general. Ordinariamente, tales proteínas sólo se encuentran en el compartimento constituido por el sistema nervioso, por lo que el sistema inmunitario al no haber entrado nunca en contacto con ellas formaría anticuerpos. Los anticuerpos destruirían las proteínas de la mielina como si se tratara de proteínas extrañas que han invadido el organismo.

Enfermedades experimentales

Consideremos más específicamente los datos experimentales sobre la causa (o causas) de la esclerosis múltiple. La etiología vírica se fundamenta en estudios epidemiológicos que correlacionan la incidencia de la enfermedad con el área geográfica en la que el paciente vivió durante su adolescencia. No existe tal correlación con el área donde la enfermedad fue diagnosticada por primera vez. Estos datos concuerdan con la opinión de que la infección vírica se produciría en una edad temprana y la expresión del virus se daría después de un período latente de muchos años. Recientemente se han descifrado otras enfermedades víricas "lentas". Algunos grupos de investigación han detectado virus en el cerebro de pacientes con esclerosis múltiple. Si bien esos datos, todavía por confirmar, serán probablemente objeto de nuevas investigaciones.

La información relativa a la predisposición genética procede de estudios realizados en personas en las que se han caracterizado determinados antígenos celulares superficiales. La distribución de dichos antígenos en la población fue estudiada inicialmente en relación con el problema de la determinación de compatibilidad para los trasplantes de tejidos. Tal caracterización mostró cierta correlación estadística con la incidencia de determinadas enfermedades, entre ellas la esclerosis múltiple.

Finalmente, los argumentos en favor de la etiología inmunológica están basados en la relación existente entre las lesiones cerebrales observadas en la esclerosis múltiple y las que acompañan a una enfermedad experimental denominada encefalomielitis alérgica. Dicha enfermedad tiene una larga y curiosa historia. Hace ahora unos cien años, Luis Pasteur y colaboradores desarrollaron un procedimiento para modificar el virus de la rabia y utilizarlo como vacuna cuando el virus se encontraba todavía en estado de incubación. Muchos pacientes se vieron beneficiados por tal tratamiento, pero un número significativo desarrolló una reacción adversa que les condujo a la parálisis e incluso a la muerte. Actualmente se conoce la causa de tal reacción. Cuando los virus de la rabia modificados eran cultivados en el cerebro y la médula espinal de los conejos, e inoculados después en pacientes, se inyectaban junto al virus moléculas del sistema nervioso del conejo. Los anticuerpos se formaban entonces no solamente frente al virus modificado, sino también frente a otros componentes de la mezcla inyectada. Uno de estos componentes se encuentra en la mielina del conejo y en la mielina humana. Si el paciente que sufría la rabia experimentaba una fuerte reacción inmunitaria, sus linfocitos destruían el tejido cerebral y la médula espinal.

La encefalomielitis alérgica experimental (EAE) se produce accidentalmente en seres humanos y puede provocarse en animales de experimentación inyectándoles una emulsión de tejido ce-

rebral y una preparación de membrana bacteriana, que actúa como adyuvante estimulando la inmunidad de forma específica. La proteína específica responsable de la enfermedad, la que provoca la reacción inmunitaria, fue aislada del tejido cerebral a finales de la década de los 50 por los grupos de investigación de Marian W. Kies, del Instituto Nacional de la Salud Mental, y de Elisabeth Roboz Einstein, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco. Ulteriormente se demostró que dicha proteína era la proteína básica de la mielina.

Si bien existen muchas semejanzas en la sintomatología y patología de la EAE y de la esclerosis múltiple, se dan también muchas diferencias. Por ejemplo, la EAE clásica no muestra los síntomas de remisión y recaída característicos de la esclerosis múltiple. Por otra parte, la terapéutica efectiva para la EAE no resulta útil en el tratamiento de la esclerosis múltiple. La terapéutica consiste en la inyección en el torrente circulatorio de la proteína básica sin la adición de adyuvante. Se trata, pues, de inyectar la sustancia que produce la enfermedad, con lo que la reacción inmunitaria tendrá lugar ahora fuera del sistema nervioso. En relación con la reacción inmunitaria, la proteína P_2 de la mielina del sistema nervioso periférico es también importante. Cuando es inyectada en animales junto a un adyuvante produce una enfermedad inmunológica. La enfermedad se denomina neuritis alérgica experimental (NAE) y consiste en una desmielinización y pérdida de las células de Schwann en los nervios periféricos. La NAE es una enfermedad muy parecida al síndrome de Guillain-Barré, que ocasionalmente aparece como secuela de una infección vírica en ciertos pacientes. (En los Estados Unidos, hace unos años, se produjeron una serie de casos de síndrome de Guillain-Barré como consecuencia del programa de vacunación masiva destinado a prevenir una forma especialmente grave de gripe.)

Tanto la NAE como el síndrome de Guillain-Barré producen parálisis y ambos pueden causar la muerte si bloquean los movimientos respiratorios. Si se disponen las medidas adecuadas para mantener las funciones vitales, las células de Schwann se regeneran y remielinizan los nervios dañados. La recuperación de los pacientes que sufren el síndrome de Guillain-Barré es a menudo completa, si bien pueden quedar algunas secuelas que afectan el control de los movimientos musculares de precisión.

Algunas veces la alteración de la mielina no puede atribuirse a etiología vírica o inmunológica y puede ser el resultado de la exposición a determinadas sustancias tóxicas. El germicida hexaclorofeno es importante a este respecto. Esta sustancia fue ampliamente utilizada en los hospitales para evitar el contagio de infecciones estafilocócicas infantiles, siendo incluido en jabones desodorantes y otros productos comerciales. El producto atraviesa la piel y es transportado por la sangre al cerebro, concentrándose en la mielina. Varios casos de intoxicación por hexaclorofeno, en los que se demostró que la mielina experimentaba tumefacción y disrupción, obligaron a retirar el producto del mercado. Ciertos compuestos utilizados en procesos industriales, como la trialquiltina y la acetil-etil-tetrametil tetralina, un aditivo odorífico de ciertos cosméticos, dañan preferencialmente a la mielina. Experimentos realizados con animales jóvenes han demostrado que durante el período de rápida formación de la mielina, la exposición a concentraciones bajas de plomo o compuestos orgánicos de estaño puede determinar un déficit marcado, y a veces permanente, de mielina.

Otro grupo de enfermedades de la mielina provoca defectos de desarrollo producidos por errores innatos del metabolismo. Una de tales enfermedades, afortunadamente rara, es la leucodistrofia de células globosas. En este defecto metabólico no pueden catabolizarse los cerebrósidos; aunque su recambio metabólico es lento, al no poder degradarse se acumulan progresivamente. Las células formadoras de mielina se colman de cerebrósidos y ello provoca, finalmente, la muerte celular. El nombre de la enfermedad hace referencia al acúmulo de cerebrósidos en forma de depósitos cristalinos en células globosas. Los experimentos sobre recambio metabólico de la mielina corroboran el mecanismo productor de la enfermedad.

Nuestra descripción de la mielina y de las células que la sintetizan ha hecho especialmente énfasis en los aspectos mejor conocidos, pero muchas de las investigaciones, como los buenos experimentos, plantean más problemas de los que resuelven. El estado actual de nuestros conocimientos sobre el mecanismo que dirige las células formadoras de mielina hacia los axones y determina la formación de la vaina, así como los datos existentes sobre síntesis y catabolismo de la mielina, permiten plantear cuestiones más específicas sobre los mecanismos implicados. Estas investigaciones servirán, a su vez, para conocer mejor las enfermedades de la mielina y utilizar terapéuticas adecuadas para combatirlas. Este es, en definitiva, el objetivo, aunque remoto, de muchos programas de investigación.

Evolución química del manto terrestre

Las mediciones exactas de las relaciones isotópicas de determinados elementos traza, contenidos en rocas pertenecientes a la corteza continental y a la oceánica, proporcionan indicios sobre la naturaleza y evolución temporal del manto

R. K. O'Nions, P. J. Hamilton y Norman M. Evensen

Según la teoría geofísica de la tectónica de placas, la corteza oceánica, que representa más de las dos terceras partes de la superficie sólida de la tierra, se está formando constantemente en las dorsales centro-oceánicas gracias a las coladas de lava procedentes del interior. Esta delgada cubierta de basalto, de un espesor medio inferior a una milésima parte del radio de la tierra, se desplaza a lo largo de millares de kilómetros sobre la parte superior del manto (de densidad considerablemente mayor) hasta alcanzar una zona de subducción, en donde se hunde para retornar a las zonas profundas de este mismo manto. Los continentes, de mayor espesor y menor densidad, representan el tercio restante de la superficie exterior del planeta y son, literalmente, islas de estabilidad en medio de este panorama cambiante. Mientras las zonas más antiguas de la corteza oceánica tienen una edad de unos 200 millones de años, se ha comprobado que una parte de la corteza continental se acerca a los 3800 millones de años, es decir, casi 20 veces más antigua. Una cosa es reconocer la realidad de la antigüedad de los continentes y otra suponerlos elementos iniciales o primitivos de la tierra; antes bien, se trata de elementos secundarios que se han formado y evolucionado a lo largo de la historia del planeta. De hecho, todavía hoy están sometidos a fenómenos de acreción. Los recientes avances de la geoquímica nos ofrecen una visión más clara del proceso de formación de los continentes a partir de material del manto, de donde se puede inferir cómo y cuándo se produjo la diferenciación global de la tierra hasta convertirse en un planeta con su actual estructura de múltiples envolturas.

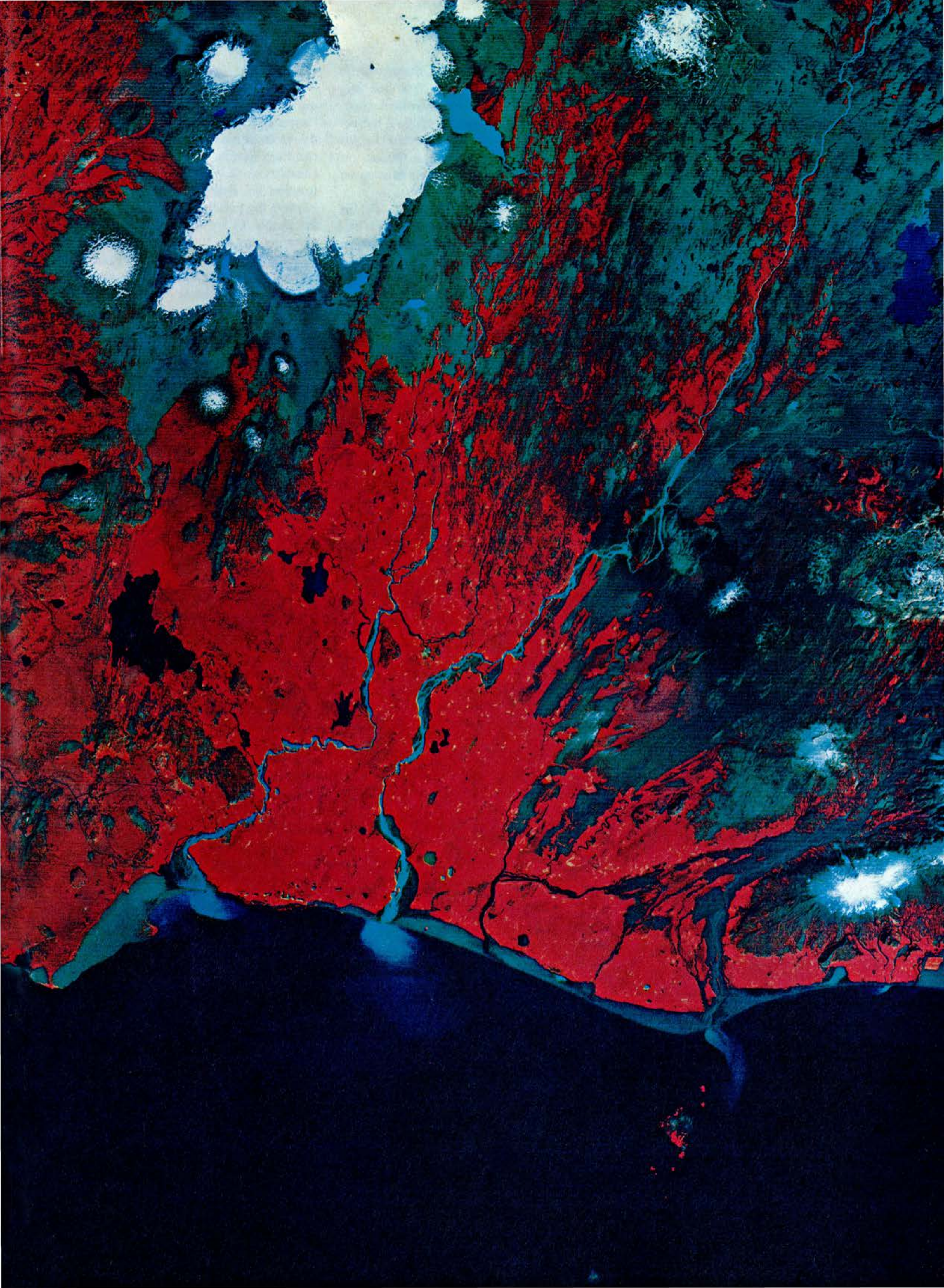
La corteza continental tiene una composición química muy distinta de la del resto de la tierra. Si bien los continentes forman sólo el 0,4 por ciento de la masa de la tierra, en ellos se han concentrado cantidades anormalmente grandes de determinados elementos que intervienen en la composición de la misma. Entre los más notables, se encuentran los isótopos radiactivos (productores de calor) del potasio, torio y uranio. Una fracción importante de cada uno de estos elementos se encuentra actualmente en los continentes. A lo largo de los dos últimos decenios se ha demostrado, basándose en dataciones radiométricas sistemáticas de rocas procedentes de los continentes, que los propios continentes deben de haber crecido de una forma más o menos continua en el transcurso de los tiempos geológicos. A principios de la década 1960-70, Patrick M. Hurley y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, pudieron demostrar que los continentes eran el resultado de muchos episodios aislados de diferenciación química, habiéndose encontrado desde entonces un gran número de pruebas y datos que apoyan esta conclusión [véase "Las rocas más antiguas y la acreción de los continentes", por S. Moorbath; INVESTIGACION Y CIENCIA, mayo, 1977].

Entre las cuestiones de mayor importancia relativas al papel que el manto terrestre ha representado en la formación de los continentes, destacan las siguientes: ¿En qué proporción interviene el manto en la formación de los continentes? Las lavas emitidas en la superficie terrestre y procedentes del manto, ¿provienen realmente de un manto previamente diferenciado o de un manto indiferenciado? ¿En qué período de la historia de la tierra se han desarrollado los continentes y a qué velocidad? ¿Cuánto material continental primitivo ha sufrido un reciclaje por retorno al manto?

Buscar respuestas satisfactorias a estas cuestiones implica la difícil tarea de descifrar, a partir de un registro geológico muy incompleto, la distribución comparativa, entre el manto y la corteza continental, de varios elementos en función del tiempo. Puesto que gran parte del material que nos interesa se encuentra fuera de nuestro alcance, debemos recurrir a la utilización de "trazadores" geoquímicos para reconstruir algún tipo de registro referente al fraccionamiento y diferenciación químicos. Las investigaciones más recientes y fructíferas han utilizado los productos de desintegración no radiactivos de elementos traza radiactivos, cuya vida media podemos comparar con la edad de la tierra. Estas asociaciones naturales "padre-hijo" comprenden, entre los isótopos padre, el potasio 40, rubidio 87, samario 147, torio 232, uranio 235 y uranio 238, y, entre los respectivos isótopos hijos, calcio 40 (o argón 40 si el potasio 40 captura un electrón), estroncio 87, neodimio 143, plomo 208, plomo 207 y plomo 206.

Característica común a todos estos elementos es que sus radios iónicos son mucho mayores que los de los constituyentes más abundantes del manto, como el magnesio, aluminio, silicio e hierro. El gran radio iónico de los elementos traza, junto con su propensión a sustituir a otros iones en las estructuras

MATERIALES PROCEDENTES DEL MANTO afloran como corteza oceánica de neoformación en esta imagen del sur de Islandia realizada por el satélite Landsat. Toda la isla se integra en el sistema de la Dorsal Centro-Atlántica. La cresta de la dorsal, una zona volcánica muy activa, tiene aquí una dirección sudoeste-nordeste. En esta imagen en falso color realizada en verano, las zonas en gris oscuro corresponden a las coladas de lava más recientes y las zonas en rojo son niveles de lava algo más antiguos y cubiertos por vegetación. Las grandes formas blancas son glaciares. Las manchas blancas circulares son volcanes cubiertos de nieve. Entre las pequeñas islas que se observan en la parte inferior están las de Heimaey y Surtsey, donde se han producido erupciones volcánicas en años recientes.



relativamente abiertas de los silicatos que forman parte de las rocas de la corteza terrestre, indujo a los geoquímicos a denominarlos elementos litófilos de gran radio iónico. A pesar de su escasa abundancia relativa en la tierra, tres de ellos (potasio, torio y uranio), son los principales responsables de gran parte de la producción del calor interno de la tierra. El grado de concentración selectiva de estos elementos traza en la corteza continental se pone de manifiesto al comparar sus abundancias en la corteza continental y en la tierra, considerada globalmente [*véase la ilustración superior de la página siguiente*]. Puesto que los elementos traza tienen radios iónicos superiores a los del magnesio, silicio e hierro, que constituyen la mayor parte de las rocas densas del manto, aquéllos no pueden sustituir con facilidad a éstos en la composición de dichas rocas.

¿Cómo puede la abundancia de un determinado isótopo hijo reflejar la historia del fraccionamiento de una parte de la tierra? Considérese la abundancia del isótopo hijo plomo 206 en un momento y lugar de la tierra determinados. Parte del plomo 206 existirá ya desde el tiempo de la formación de la tierra, aunque habrá aumentado gracias a las adiciones procedentes de la desintegración del isótopo progenitor uranio 238. La cantidad exacta de plomo 206 reflejará cambios en la relación uranio/plomo en función del tiempo. Si, por ejemplo, la historia del fraccionamiento del uranio y del plomo es tal que, en un momento determinado del pasado, una zona de la tierra poseía una relación uranio/plomo elevada y otra zona presentaba un valor bajo para esta misma relación, transcurrido un lapso de tiempo dado cabrá esperar que la abundancia relativa de plomo 206 en la primera zona sea mayor que en la segunda. La diferencia se ilustra adecuadamente expresando la abundancia de plomo 206 con respecto a la abundancia de un isótopo del plomo que no haya experimentado adiciones radiogénicas, como es el caso del plomo 204. Así pues, la historia del fraccionamiento del uranio y el plomo en la tierra queda registrada en la variación en el tiempo y en el espacio de la relación plomo 206/plomo 204.

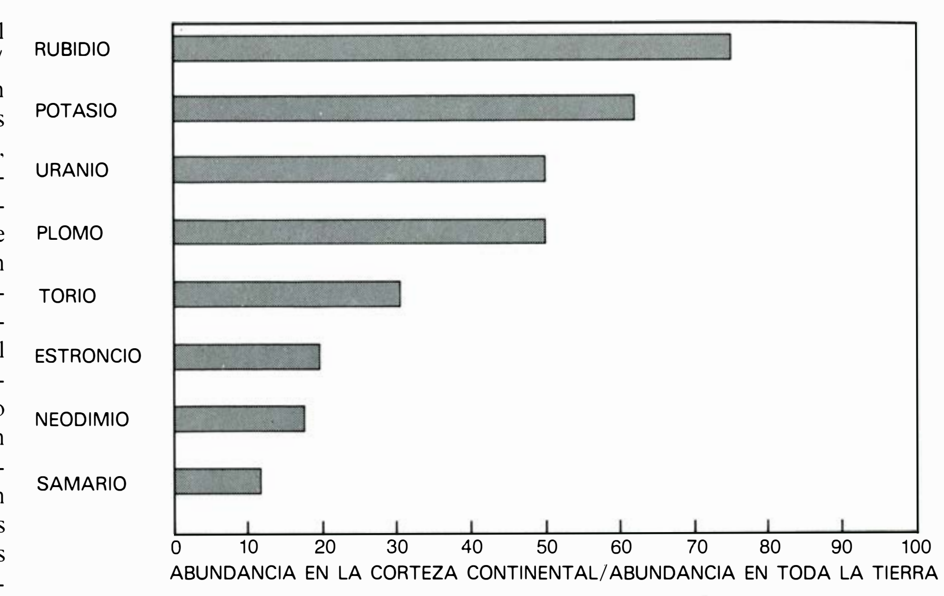
De modo parecido, las relaciones plomo 208/plomo 204, plomo 207/plomo 204, neodimio 143/neodimio 144, estroncio 87/estroncio 86 y argón 40/argón 36 reflejarán, respectivamente, las historias del fraccionamiento de las asociaciones padre-hijo correspondientes a los pares torio-plomo, uranio-plomo, samario-neodimio, rubidio-estroncio y potasio-argón. Puesto que todas las vidas medias de los isótopos padres pueden parangonarse con la edad de la tierra, las relaciones isotópicas actuales del argón, estroncio, neodimio y plomo pueden considerarse reflejo de los fraccionamientos padre-hijo que han tenido lugar a lo largo de la historia de la tierra. El isótopo hijo de un padre con una vida media mucho más corta, como puede ser el xenón 129, producto de la desintegración del iodo 129, con una vida media de 16 millones de años, puede reflejar sólo el fraccionamiento del iodo y del xenón que ocurrió durante los dos primeros cien millones de años transcurridos desde la formación de la tierra. Las asociaciones padre-hijo de vida media tan corta ofrecen un valor limitado a la hora de estudiar procesos que cubren un extenso intervalo de la historia de la tierra, como es el caso de la acreción de los continentes.

La eliminación selectiva, del manto, de elementos litófilos de gran radio iónico y su concentración en la corteza continental en desarrollo son procesos que implican fraccionamientos relativos de las abundancias de estos elementos.

ISOTOPO PADRE		ISOTOPO HIJO	OTROS PRODUCTOS DE DESINTEGRACION	VIDA MEDIA (10⁹ AÑOS)
RUBIDIO 87	→	ESTRONCIO 87	+ 1 ELECTRON	48.8
POTASIO 40	→	CALCIO 40	+ 1 ELECTRON	1.47
POTASIO 40 (+1 ELECTRON)	→	ARGON 40		11.8
URANIO 238	→	PLOMO 206	+ 8 PARTICULAS ALFA 6 ELECTRONES	4:468
URANIO 235	→	PLOMO 207	+ 7 PARTICULAS ALFA 4 ELECTRONES	.7038
TORIO 232	→	PLOMO 208	+ 6 PARTICULAS ALFA 4 ELECTRONES	14.008
SAMARIO 147	→	NEODIMIO 143	+ 1 PARTICULA ALFA	106

GRANDES RADIOS IONICOS de distintos elementos traza radiactivos y sus respectivos productos principales de desintegración. Resultan de gran importancia para la utilización efectiva de estos isótopos en la investigación geoquímica. Los iones que constituyen cada asociación "padre-hijo" se dibujan a la izquierda a igual escala. (El menor de estos isótopos, el samario 147, tiene un radio iónico de 0,964 angstrom.) Tal como puede observarse en la columna de la derecha, todos los isótopos padre muestran una vida media del orden de (o superior a) la edad estimada de la Tierra (4550 millones de años). El potasio 40 puede desintegrarse tanto por captura como por emisión de un electrón, produciendo isótopos hijos distintos. A excepción del calcio, todos los isótopos padre e hijo representados se encuentran en la tierra en forma de trazas (una parte por millón, o menos). Estos elementos traza poseen un radio iónico mayor que los de los elementos más frecuentes, silicio, aluminio, magnesio, calcio e hierro, que, en forma de óxidos, constituyen la mayor parte del manto terrestre. Los iones grandes no encajan dentro de las densas estructuras cristalinas de los minerales del manto, que acomodan generalmente sólo los iones más pequeños y abundantes. En consecuencia, los iones mayores emigran hacia la corteza, donde forman parte de estructuras cristalinas menos densas. El ion mayor, el del argón 40, puede escaparse a la atmósfera, que está constituida casi por un uno por ciento de este gas. El argón presente en la atmósfera se origina casi en su totalidad a partir de la desintegración del potasio 40.

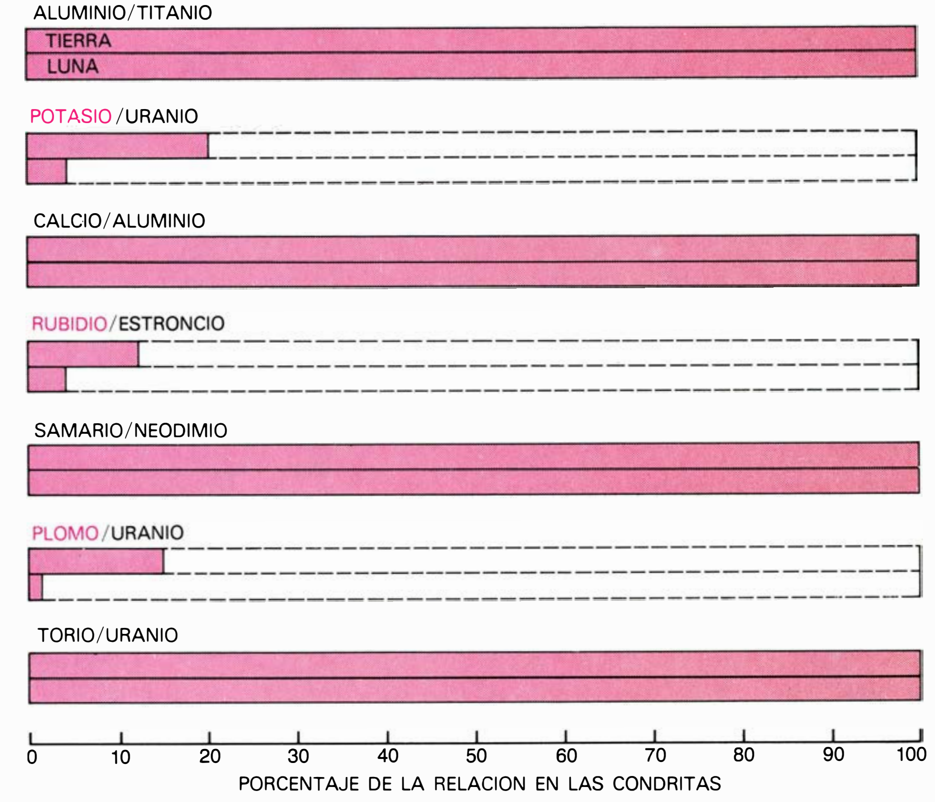
Así, por ejemplo, la corteza continental se desarrolla con una relación rubidio/estroncio más alta y con una relación samario/neodimio más baja que las existentes en el manto. En ambos casos, los continentes concentran de forma selectiva el elemento de mayor radio iónico de cada par. A consecuencia de ello, los continentes evolucionan con una mayor abundancia relativa de estroncio 87 y una menor abundancia relativa de neodimio 143 con respecto al manto, quedando registrado este fenómeno en la elevada relación estroncio 87/estroncio 86 y en la baja relación neodimio 143/neodimio 144 de los continentes respecto del manto residual. En principio, pues, los estudios isotópicos de nuevas adiciones de material a los continentes, en diversas épocas del pasado, pueden suministrar información sobre la historia de la diferenciación preliminar de la fuente que aportó la muestra analizada. De modo parecido, la composición isotópica actual de muestras procedentes del manto suministrará, en principio, información sobre la prehistoria de este último.



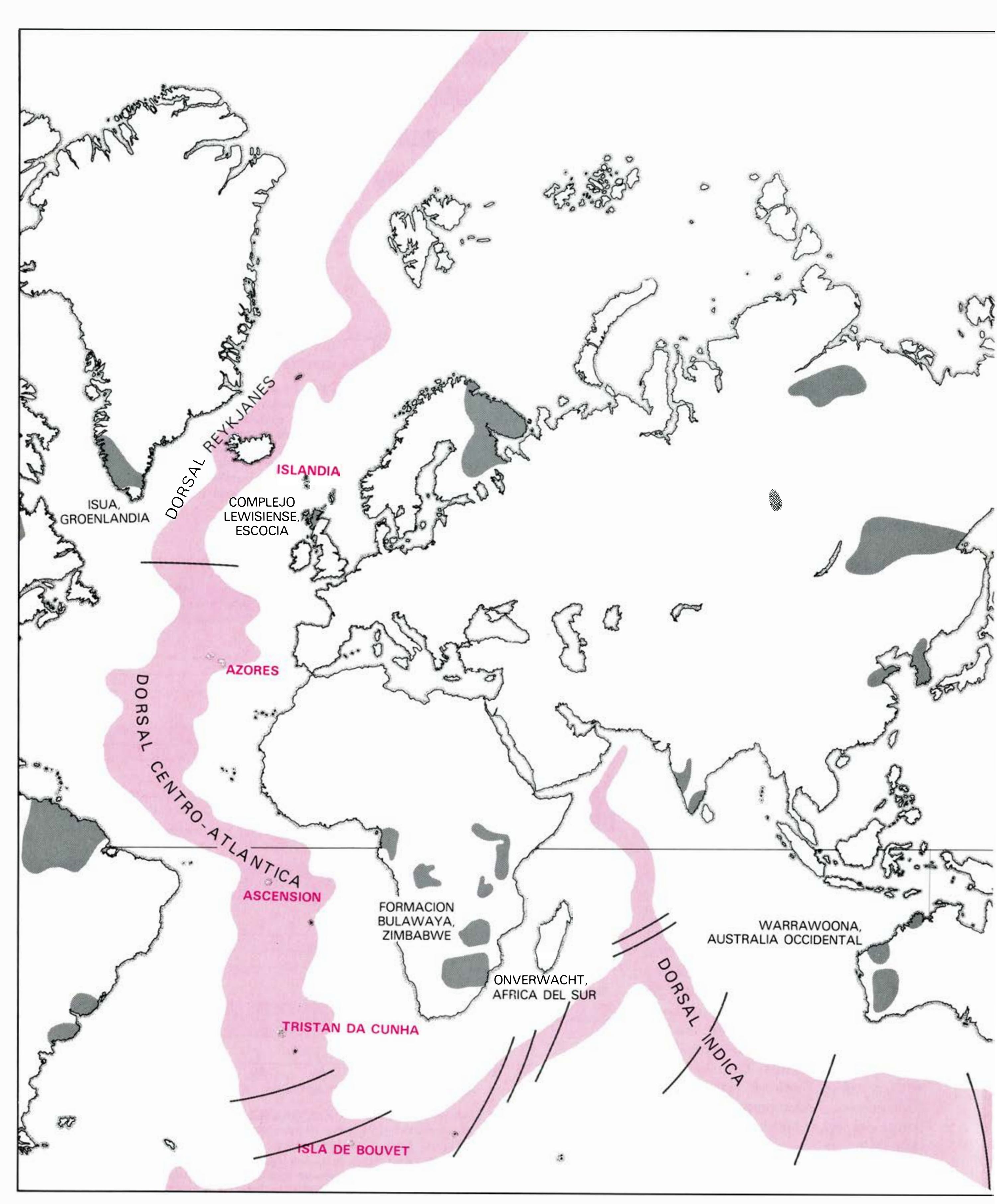
ABUNDANCIA DE ALGUNOS ELEMENTOS TRAZA de gran radio iónico existentes en la corteza continental, según S. R. Taylor, de la Australian National University. Se trata de una estima en función de sus abundancias globales en la tierra. Los elementos de mayor radio iónico tienden a presentar mayor grado de enriquecimiento en la corteza. A pesar de la insignificante masa de la corteza, comparada con el manto, se encuentra en ella una fracción importante del contenido total de la tierra en elementos de gran radio iónico. Debido a la tendencia de estos elementos a reemplazar a los de menor radio iónico en las estructuras relativamente abiertas de los silicatos que constituyen las rocas de la corteza, los geoquímicos les aplicaron el nombre de elementos litófilos de gran radio iónico.

A lo largo del artículo vamos a ocuparnos sobre todo de los avances recientes en el campo de la geoquímica y que proporcionan nuevos puntos de vista sobre la naturaleza y duración de los procesos que han conducido a la diferenciación química actual de la tierra. Antes de entrar en detalles, será conveniente comparar las abundancias de algunos elementos existentes en la tierra, y que inciden de lleno en nuestra exposición, con las abundancias de los mismos estimadas en la primitiva nebulosa solar y en la luna, único objeto de tamaño notable del sistema solar del que se dispone actualmente de datos apropiados.

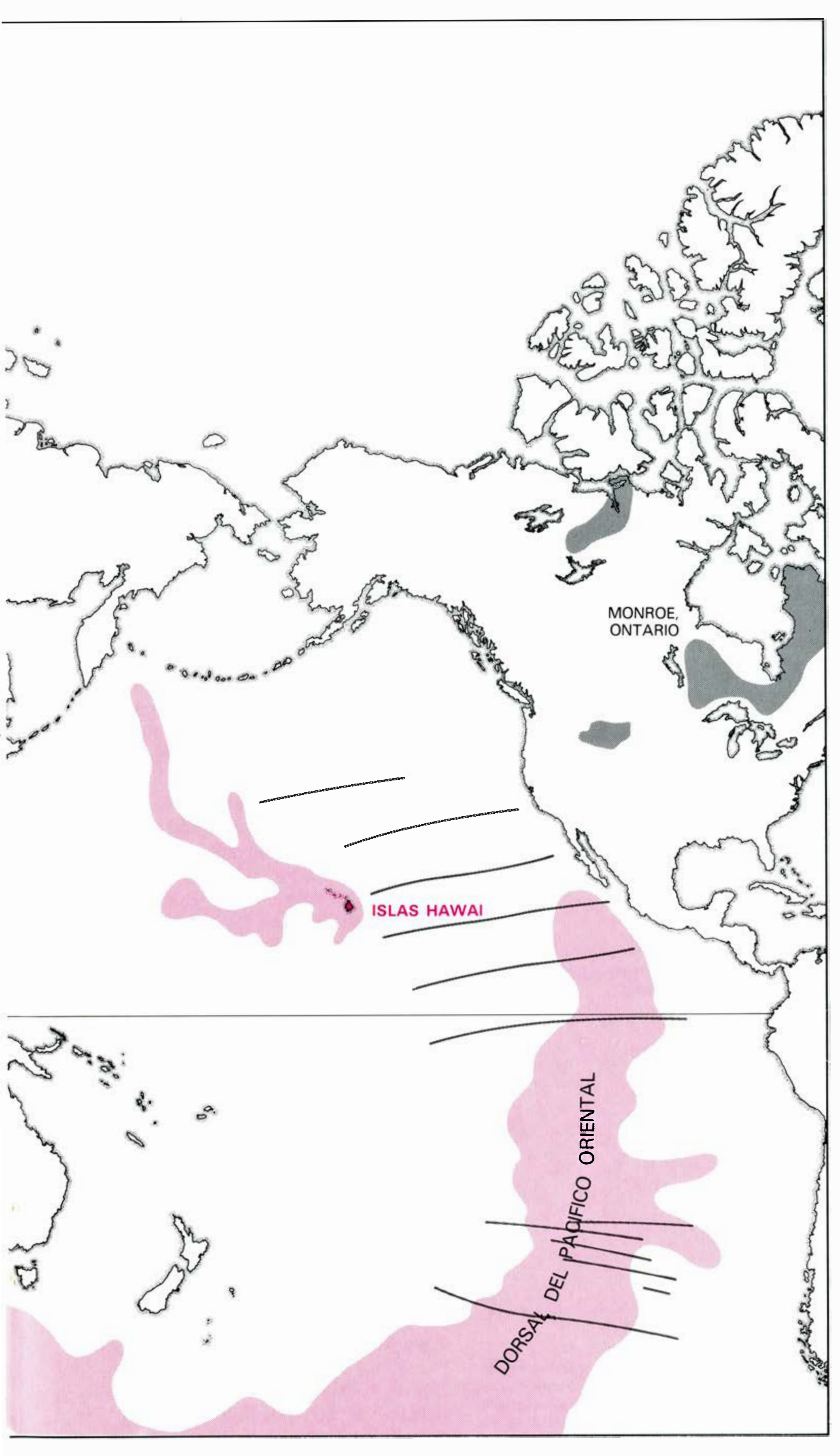
Los planetas terrestres, o planetas interiores, como la Tierra y Marte, en general han retenido de la nebulosa solar un complemento de los elementos más volátiles (hidrógeno, por ejemplo), mucho menos importante que los planetas exteriores gigantes, como Júpiter y Saturno. Además, las recientes exploraciones planetarias han descubierto notables diferencias de composición entre la Tierra, Marte y la Luna. Gran parte del análisis subsiguiente se referirá a las abundancias y relaciones isotópicas del potasio, argón, rubidio, estroncio, neodimio, samario, plomo, torio y uranio, todos los cuales son constituyentes traza, no sólo de la Tierra, sino también de los otros planetas terrestres. Al objeto de establecer comparaciones, nos ocuparemos también del magnesio, el aluminio y el silicio, constituyentes principales de la Tierra y de los otros planetas



LA TIERRA Y LA LUNA MUESTRAN UN EMPOBRECIMIENTO en determinados elementos traza volátiles (*en color*), al comparar las relaciones de pares de elementos con las relaciones correspondientes en condritas carbonáceas, que se consideran representativas de la composición media del sistema solar. (Se utilizan estas relaciones, en vez de las abundancias medias, porque pueden determinarse con mayor precisión). Cuando ambos elementos son no volátiles, y por consiguiente es presumible que se hayan condensado conjuntamente a temperaturas elevadas a partir de la nebulosa solar primitiva, su relación es idéntica en la Tierra, en la Luna y en las condritas. Sin embargo, se observa que la relación entre elementos volátiles y no volátiles es inferior en la Tierra que en las condritas, siendo aún menor en la Luna. Los elementos volátiles debieron condensarse a partir de la nebulosa solar en enfriamiento en una época más tardía que los no volátiles. Así, la Tierra y la Luna presentan un empobrecimiento de esta fracción volátil. (El plomo considerado en la ilustración es el inicial; no incluye por tanto al plomo producido con posterioridad a la formación de la Tierra por desintegración del uranio y del torio.)



LOCALIZACION DE LAS MUESTRAS DE ROCAS analizadas en las investigaciones de las relaciones isotópicas de los elementos litófilos de gran radio iónico existentes en la corteza continental y oceánica. Las zonas de la corteza continental de edad superior a los 2500 millones de años aparecen en gris; se suelen hallar en las regiones más antiguas y tectónicamente estables ("escudos") de los continentes. Las recientes determinaciones de la historia isotópica primitiva de la tierra se han realizado utilizando especialmente rocas de las regiones citadas. Las zonas coloreadas comprenden las partes más recientes de la corteza terrestre, es decir, las dorsales centro-oceánicas, donde se forma corteza nueva gracias al flujo de lava procedente

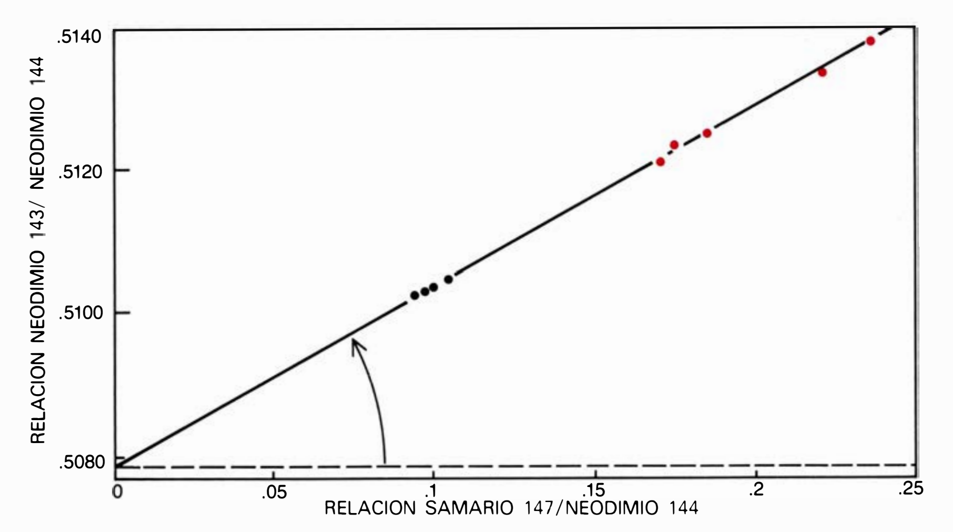


del manto. Los análisis isotópicos de estas lavas indican que derivan de material del manto empobrecido en los elementos concentrados selectivamente en la corteza continental (en particular en los elementos traza radiactivos productores de calor: potasio, torio y uranio). Las islas oceánicas, marcadas con un color más intenso, han emergido gracias a la salida al exterior de masas de lava especialmente voluminosas. Derivan de un material del manto menos empobrecido que el resto de las dorsales centro-oceánicas.

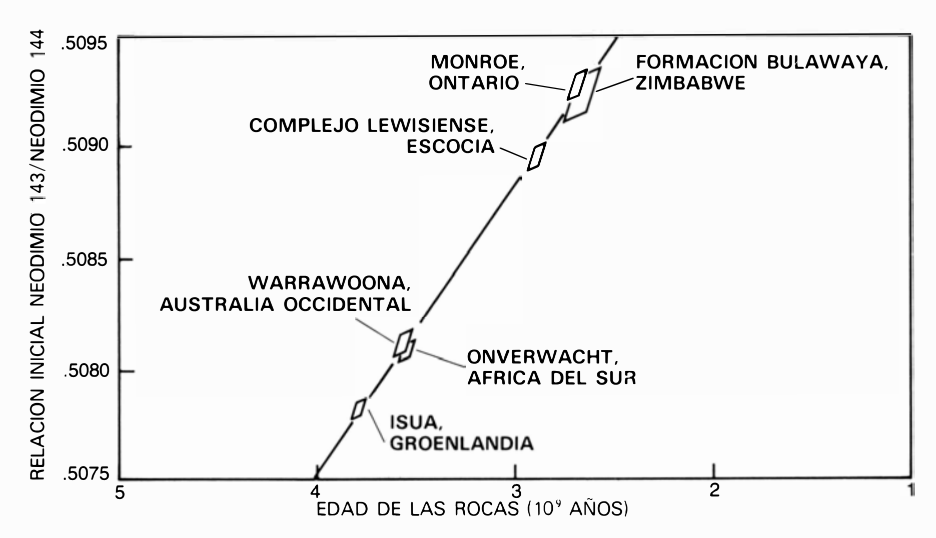
terrestres. Por lo que se refiere a estos últimos elementos en particular, los meteoritos conocidos por condritas carbonáceas representan la mejor aproximación a la hora de determinar su abundancia respectiva en la nebulosa solar inicial.

El primer punto que debe resaltarse de una comparación de este tipo es que las abundancias de la mayoría de los últimos elementos citados vienen a coincidir, grosso modo, en la Tierra, la Luna y las condritas carbonáceas. Por el contrario, el potasio, el rubidio y el plomo abundan mucho menos en la Tierra y en la Luna que en las condritas, siendo el grado de empobrecimiento mayor en el caso de nuestro satélite. A partir de las relaciones potasio/uranio medidas en muestras lunares, terrestres y condríticas podemos demostrar el empobrecimiento relativo de potasio. El empobrecimiento relativo de rubidio y plomo puede deducirse a partir de las composiciones isotópicas conocidas del estroncio y del plomo en esos tres materiales.

Lawrence Grossman, de la Universidad de Chicago, ha calculado que en un gas de igual composición que el del Sol, los elementos calcio, aluminio, estroncio, neodimio, samario, uranio y torio serían todos ellos muy poco volátiles, condensándose a temperaturas superiores a 1350 grados Kelvin, mientras que el potasio, el rubidio y el plomo lo harían a temperaturas inferiores, siendo el más volátil de éstos el plomo, que se condensaría a unos 520 grados K. Está fuera del propósito de este artículo tratar los posibles mecanismos mediante los cuales este fraccionamiento de elementos de distinta volatilidad pudo haber ocurrido en las etapas más tempranas del sistema solar. Aquí basta con señalar que la Tierra y la Luna parecen haberse formado a partir de un conjunto de elementos poco volátiles que se encontraban disponibles en unas proporciones aproximadas a las de las condritas, pero con un marcado (extremo, en el caso de la Luna) empobrecimiento de los elementos más volátiles. (La idea de que la Tierra tenía una composición condrítica estuvo muy extendida, durante muchos años, entre los geofísicos dedicados a estudiar el flujo térmico terrestre. Se basaba en la coincidencia entre la pérdida de calor por conducción que experimenta la Tierra y el ritmo medio de producción de calor de los meteoritos condríticos. Sin embargo, hoy en día parece que, en nuestro planeta, las relaciones de los elementos poco volátiles torio y uranio [dos de los más importantes en la producción de calor terrestre], respecto al potasio, que es el más volátil y el ter-



ROCAS DE ISUA, antiguo depósito de rocas volcánicas metamorfizadas localizado en Groenlandia occidental. Esas rocas se dataron mediante la medición de sus relaciones isotópicas de samario/neodimio y las del neodimio. Suponiendo que las rocas se formaran originalmente a partir de una parte del manto con una relación uniforme de neodimio 143 (el isótopo hijo del samario 147) con respecto al neodimio 144 (isótopo que no es producido ni consumido por la desintegración radiactiva), entonces, las relaciones neodimio 143/neodimio 144 de las rocas aumentarán con el tiempo a un ritmo proporcional a sus relaciones de samario 147/neodimio 144. Las rocas ígneas básicas (*puntos en color*) se forman con relaciones de samario 147/neodimio 144 (próximas a las del manto original) más elevadas que las que presentan las rocas enriquecidas en sílice (*puntos negros*), más ácidas. En una representación de la relación neodimio 143/neodimio 144 con respecto a la relación samario 147/neodimio 144, como la que vemos aquí, todos los puntos se situarían en un principio sobre la línea horizontal de trazos. Al evolucionar las rocas e ir adquiriendo relaciones isotópicas más elevadas de neodimio 143/neodimio 144, el aumento más rápido de la relación neodimio 143/neodimio 144 en rocas con relaciones más altas de samario 147/neodimio 144 provoca el giro hacia arriba de la línea. La pendiente de la línea resultante (denominada isocrona) indica el tiempo durante el cual las rocas han evolucionado independientemente desde su formación a partir de una fuente homogénea. La edad de las muestras de Isua determinada por este método es de 3770 millones de años, más de cuatro quintas partes de la edad de la tierra. Toda alteración que adicionara o eliminara samario o neodimio durante este tiempo tendería a destruir la linearidad de la isocrona. Sólo una roca ideal, con una relación samario 147/neodimio 144 igual a cero, implicaría un cambio nulo en su relación neodimio 143/neodimio 144 y, por tanto, conservaría el valor original de esta relación en la época que se formaron las rocas. Puesto que no es probable que se formen rocas con unas relaciones de samario 147/neodimio 144 mucho más bajas que las que aquí se observan, la relación inicial de neodimio 143/neodimio 144 de las rocas de Isua se obtiene extrapolando al cero la isocrona sobre el eje de la relación samario 147/neodimio 144. La relación inicial así obtenida constituye un indicador de la composición isotópica del manto en ese momento (hace 3770 millones de años). Se pueden realizar mediciones similares con otras asociaciones padre-hijo, si bien las proporciones de la mayoría de estos elementos varían en el curso del metamorfismo y no nos facilitan, por tanto, mediante la técnica de la isocrona, dataciones tan ajustadas.



EVOLUCION DE LA RELACION neodimio 143/neodimio 144 en el manto. Se representan las edades de unas muestras de roca pertenecientes a seis regiones antiguas de la corteza continental en función de sus relaciones iniciales de neodimio 143/neodimio 144, deducidas a través de la técnica de la isocrona. En este caso los símbolos son paralelogramos en cuyo interior hay una probabilidad del 95 por ciento de que se halle el valor verdadero. Todas las determinaciones de edad aquí expuestas fueron obtenidas por los autores de este artículo, excepto las correspondientes a Monroe Township (Ontario) realizada por Alan Zindler y Stanley R. Hart, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. El hecho de que los puntos caigan cerca de una recta que representa el aumento de la relación neodimio 143/neodimio 144 en meteoritos con una relación samario 147/neodimio 144 típicamente condrítica, permite asegurar que el manto se formó teniendo una relación samario/neodimio de tipo condrítico.

cer elemento en importancia en la producción de calor, difieren mucho de esas mismas relaciones correspondientes a las condritas.)

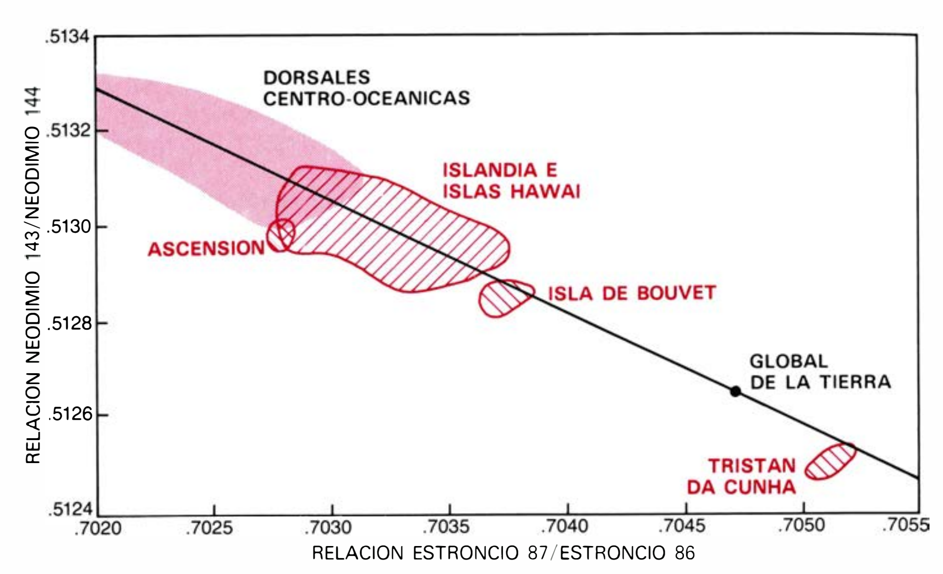
Tras considerar brevemente las abundancias globales de algunos elementos terrestres en el contexto de la composición de la primitiva nebulosa solar, volvamos ahora nuestra atención a la diferenciación de nuestro propio planeta. En primer lugar, consideraremos los progresos realizados en la obtención de datos sobre isótopos en algunas de las zonas más antiguas de los continentes. El primer objetivo de este tipo de investigaciones es encontrar los valores de las relaciones estroncio 87/estroncio 86, neodimio 143/neodimio 144, plomo 208/plomo 204, plomo 207/plomo 204 y plomo 206/plomo 204 para la región fuente de un determinado segmento de la corteza continental, y luego, comparar esos valores con las relaciones isotópicas predichas para el manto sin diferenciar en el momento de la formación de las rocas cuyas relaciones isotópicas se estudia.

Desde 1975 se ha progresado mucho en el aprovechamiento del sistema samario-neodimio para resolver problemas de geocronología y en la utilización del neodimio 143 como trazador natural de procesos geológicos. Los sistemas rubidio-estroncio y uranio-plomo se han empleado con éxito a lo largo de veinte años, o más, pero la aplicación del sistema samario-neodimio presentó dificultades técnicas tanto en la extracción de estos dos elementos a partir de las muestras de roca como en los análisis de los isótopos de los mismos con el grado de precisión requerido. Puesto que el samario 147 se desintegra con suma lentitud, hay que determinar diferencias extraordinariamente pequeñas en la abundancia de neodimio 143. Para realizar estas mediciones, disponemos ya de técnicas de espectrometría de masas muy precisas, gracias, sobre todo, a los esfuerzos realizados por Gerald J. Wasserburg y sus colaboradores del Instituto de Tecnología de California. En 1975, Guenter W. Lugmair, de la Universidad de California en San Diego, publicó el primer análisis isotópico preciso del sistema samario-neodimio, realizado en un meteorito acondrítico y en una muestra lunar. Posteriormente, C. J. Allègre y sus colaboradores, de la Universidad de París, Donald J. DePaolo y Wasserburg en el Instituto de Tecnología de California y nuestro grupo, que entonces se encontraba en el Observatorio Geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, publicamos los resultados de los estudios sobre el isótopo neodimio reali-

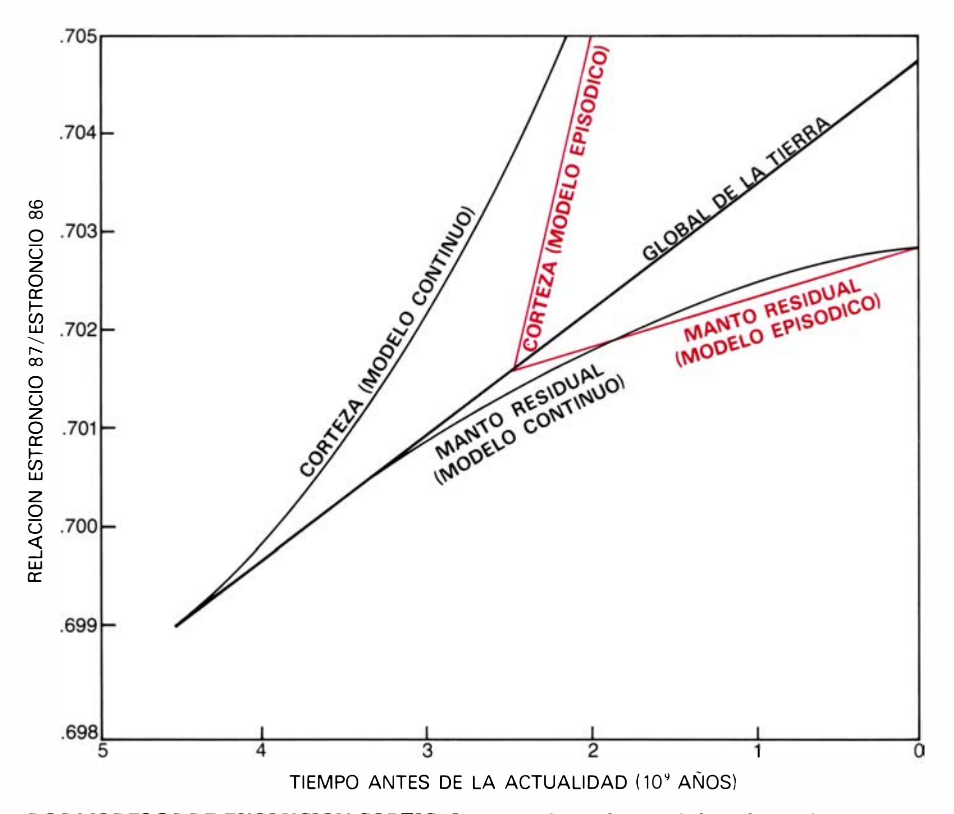
zados en una serie de muestras terrestres y demostramos la utilidad del isótopo neodimio para la investigación de determinados problemas geológicos.

El sistema samario-neodimio se ha mostrado de gran eficacia para estudiar los componentes más antiguos de la corteza continental, pues ha sobrevivido a una serie de procesos de alteración. La relación rubidio/estroncio se ve a menudo alterada por la meteorización y por otros procesos que afectan a las rocas volcánicas después de su erupción, lo que determina que las relaciones observadas de estroncio 87/estroncio 86 sean difíciles de interpretar. Por contra, las investigaciones realizadas hasta ahora han demostrado que las relaciones samario/neodimio sufren muchas menos alteraciones. Esta afortunada propiedad del samario y del neodimio nos ha permitido obtener edades precisas en base a la relación samario/neodimio y valores de la relación inicial neodimio 143/neodimio 144 para algunas partes antiguas de los continentes [*véase la ilustración superior de la página precedente*]. En particular, a partir de la relación samario/neodimio, obtuvimos edades de una serie de rocas supracorticales (es decir, rocas formadas sobre una corteza preexistente) descubiertas en Isua (Groenlandia) y que figuran entre las más antiguas conocidas de la tierra. Si bien las muestras que estudiamos se habían alterado mucho desde su extrusión original en forma de lava, proporcionaron una edad exacta de 3770 millones de años, lo cual concuerda muy bien con las dataciones obtenidas por el grupo de Allègre en París, basadas en análisis de la relación uranio/plomo en muestras de circón (silicato de circonio) procedentes de la localidad de Isua. Además de determinar la época en que se formaron las muestras de Isua, establecimos también con gran precisión la relación del isótopo neodimio en su fuente original. Los autores de este artículo han obtenido, asimismo, edades exactas a partir de la relación samario/neodimio y relaciones isotópicas iniciales de neodimio en el denominado grupo de Onverwatch de Africa del Sur (3540 millones de años), en el grupo Warrawoona de Australia occidental (3560 millones de años), en el complejo Lewisiense de Escocia (2920 millones de años) y en la formación Bulawayan de Rodesia (2640 millones de años).

Las edades y las relaciones isotópicas iniciales del neodimio de esas rocas pueden representarse en unos ejes de coordenadas y compararse con la evolución de la relación isotópica del neodimio de hace 4550 millones de años pre-



CORRELACION NEGATIVA observada al representar las mediciones de la relaciones isotópica del neodimio en función de las mediciones de las relaciones isotópicas del estroncio efectuadas en muestras de rocas volcánicas recientes, obtenidas de las dorsales centro-oceánicas (*color claro*) y de las islas oceánicas (*color oscuro*). Durante la formación de la corteza continental, el manto estaba más empobrecido en rubidio y en neodimio que en estroncio y samario. Más tarde, la relación neodimio 143/neodimio 144 aumentó con mayor rapidez y la relación estroncito 87/estroncio 86 aumentó con más lentitud en el manto empobrecido que en el manto no empobrecido. El manto subyacente a las dorsales se encontraba, según parecía, más empobrecido que el formador de las islas oceánicas. Suponiendo que el manto no empobrecido posea la relación samario/neodimio característica de las condritas, se puede calcular la relación actual de neodimio 143/neodimio 144 de la tierra considerada globalmente. Si el manto empobrecido se encuentra sobre la línea de anticorrelación, también puede determinarse su relación actual de estroncio 87/estroncio 86, y por tanto su relación de rubidio/estroncio. A medida que el manto empobrecido evolucionó químicamente, alejándose del punto representativo del valor global de la tierra, los continentes evolucionaron de manera complementaria. El punto representativo de una corteza continental típica se situaría, por lo tanto, fuera del ángulo inferior derecho de la gráfica.

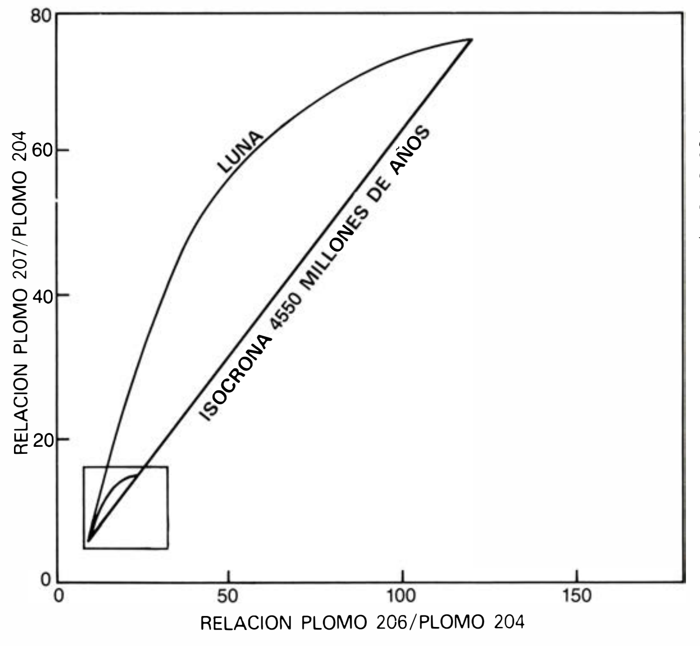


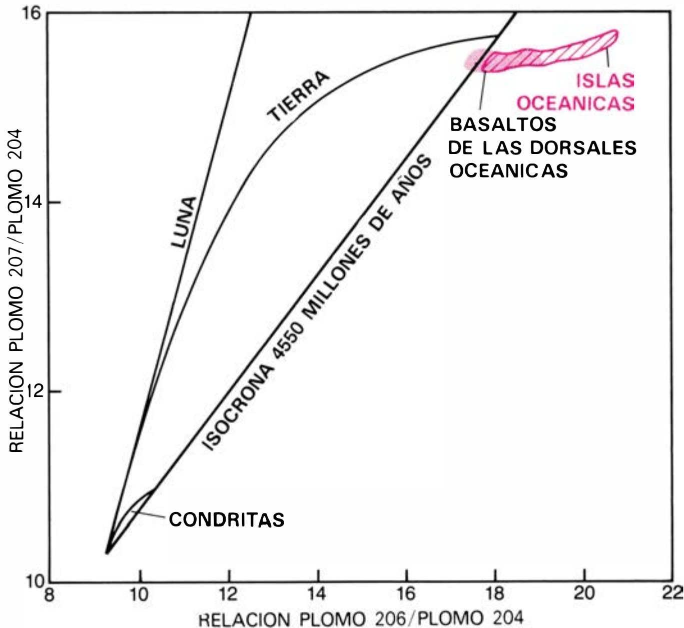
DOS MODELOS DE EVOLUCION CORTICAL comparados en función de la evolución de su respectiva relación estroncio 87/estroncio 86 en la corteza y en el manto. En el modelo continuo, la corteza se genera sin interrupción desde la formación de la tierra; la corteza y el manto evolucionan con unas relaciones isotópicas para el estroncio que se van distanciando de las relaciones que presenta la tierra considerada globalmente. En el modelo episódico, se supone que la corteza actual se formó hace 2500 millones de años. En realidad, se conocen regiones de la corteza más antiguas. Incluso en este caso extremo, la evolución del manto es muy similar en los dos modelos, pues el manto constituye una reserva de estroncio mucho mayor que la corteza. Las curvas representativas de los dos modelos, en términos de la evolución de sus relaciones isotópicas de neodimio, serían más parecidas: samario y neodimio muestran un fraccionamiento menor entre la corteza y el manto que el rubidio y el estroncio.

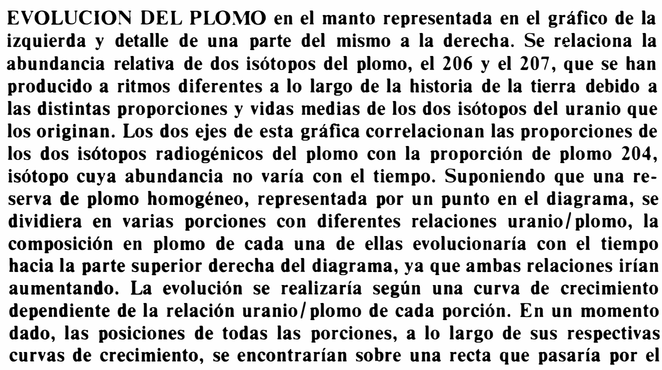
sente en materiales que, según se deduce del análisis de meteoritos, tienen una relación samario/ neodimio de carácter condrítico. Se obtiene así una línea que corresponde a una relación samario/ neodimio de 0,31, el cálculo más fino que disponemos hoy sobre la relación de abundancia cósmica. Puesto que los datos correspondientes a muestras terrestres de una edad superior a los 2500 millones de años quedan representados cerca de esa línea, puede deducirse que la región fuente de la primitiva corteza, y por tanto la tierra, considerada globalmente, tenía una relación samario/neodimio no diferenciable de la relación correspondiente a la abundancia cósmica. La separación de la corteza continental deja al manto residual con un valor más elevado de su relación samario/neodimio que el global de la tierra. De ahí que la relación isotópica media del neodimio del manto actual no se sitúe en la parte extrapolada de la línea, sino que caiga por encima de ella. Es más, los resultados obtenidos concuerdan con la ausencia manifiesta de rocas continentales de edades superiores a las muestras procedentes de Isua. La separación de grandes masas de naturaleza continental hace unos 3800 millones de años (en el supuesto de que se hubiera producido) podría identificarse a partir de las relaciones isotópicas iniciales del neodimio de las rocas volcánicas básicas, emitidas en épocas más recientes y preservadas en los continentes.

Dando por cierto que el manto indiferenciado debiera tener siempre una relación samario/neodimio igual a la relación correspondiente a la abundancia cósmica, hemos podido calcular con exactitud la composición isotópica actual de neodimio en el manto indiferenciado. Para identificar aquellas partes del manto que han contribuido a la acreción de los continentes con material, sería sin duda de gran valor realizar un estudio de la composición en isótopos de neodimio del manto superior. A excepción de los fragmentos xenolíticos (literalmente "rocas extrañas") del manto, que de vez en cuando son transportados hasta la superficie a través de chimeneas de kimberlita y algunas formaciones basálticas, resulta imposible disponer de muestras procedentes directamente del manto superior. De ahí que haya sido necesario recoger información de los productos diferenciados del manto, es decir, de las lavas basálticas emitidas en las cuencas oceánicas y en los continentes. La mayoría de los basaltos recientes se han emitido a lo largo de las dorsales centro-oceánicas, donde se forman las placas y se produce la expansión del fondo oceánico. Sin embargo, la erupción de los basaltos se produce también, aunque en pequeñas cantidades, en el interior de las placas y a lo largo de los arcos de islas.

Hasta el comienzo del "Deep Sea Drilling Project" (Proyecto de sondeos en zonas de mar profundo), sólo se habían extraído del fondo oceánico un pequeño número de muestras de basalto; no obstante, la situación ha ido cambiando de manera radical a lo largo de los últimos diez años. El Deep Sea Drilling Project acaba de acometer un programa internacional de sondeos oceánicos con la participación de Francia, República Federal Alemana, Japón, Gran Bretaña y la Unión Soviética; se han obtenido ya muestras de un gran número de puntos de las cuencas oceánicas atlántica, índica y pacífica. Se han dragado, además, otras muchas muestras en las dorsales centro-oceánicas. Probablemente, lo más notable de estas operaciones de dragado sean los sondeos sistemáticos y muy próximos entre sí efec-





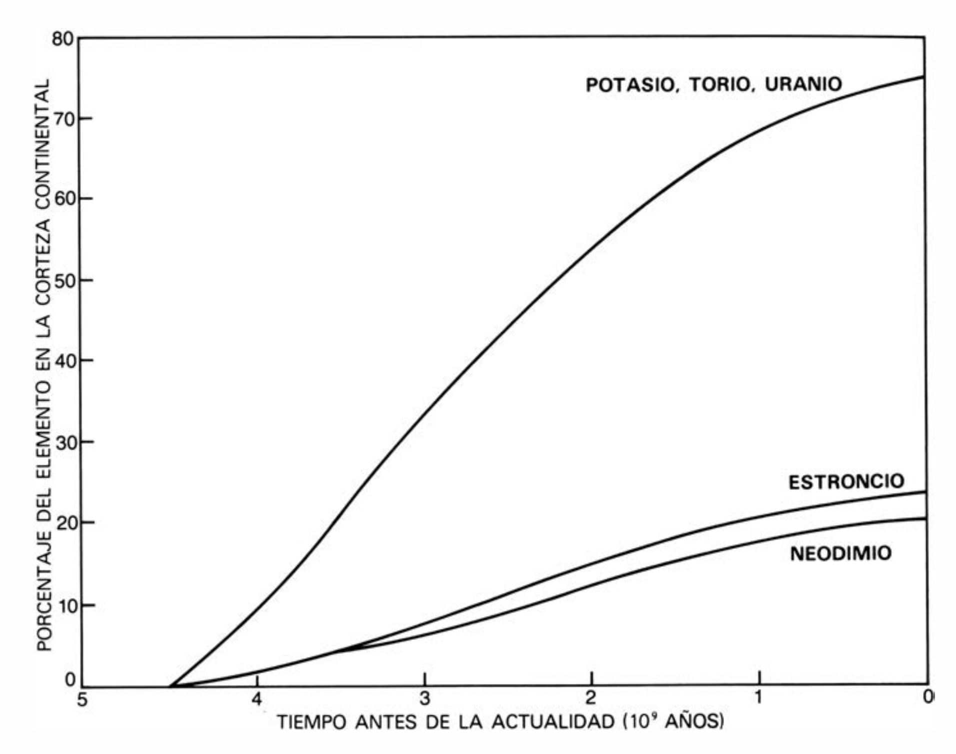

EVOLUCION DEL PLOMO en el manto representada en el gráfico de la izquierda y detalle de una parte del mismo a la derecha. Se relaciona la abundancia relativa de dos isótopos del plomo, el 206 y el 207, que se han producido a ritmos diferentes a lo largo de la historia de la tierra debido a las distintas proporciones y vidas medias de los dos isótopos del uranio que los originan. Los dos ejes de esta gráfica correlacionan las proporciones de los dos isótopos radiogénicos del plomo con la proporción de plomo 204, isótopo cuya abundancia no varía con el tiempo. Suponiendo que una reserva de plomo homogéneo, representada por un punto en el diagrama, se dividiera en varias porciones con diferentes relaciones uranio/plomo, la composición en plomo de cada una de ellas evolucionaría con el tiempo hacia la parte superior derecha del diagrama, ya que ambas relaciones irían aumentando. La evolución se realizaría según una curva de crecimiento dependiente de la relación uranio/plomo de cada porción. En un momento dado, las posiciones de todas las porciones, a lo largo de sus respectivas curvas de crecimiento, se encontrarían sobre una recta que pasaría por el punto representativo de la composición original de plomo. La pendiente de la recta estaría relacionada con la edad del sistema. En este caso se toma como composición original la del plomo inicial deducido de las mediciones realizadas en meteoritos con relaciones muy bajas de uranio/plomo. Si esta relación fue uniforme en toda la nebulosa solar inicial, representaría el punto de origen de las curvas de crecimiento de la Tierra, la Luna y las condritas, cuyas relaciones uranio/plomo son muy diferentes. En la actualidad, las composiciones de estos cuerpos quedarían representadas a lo largo de una recta que pasaría por el punto correspondiente al plomo inicial, con una pendiente equivalente a la edad del sistema solar. Las composiciones de los basaltos oceánicos se recogen a la derecha de esta línea, denominada geocrona. Unas muestras que, a partir de un análisis de sus relaciones isotópicas de estroncio y neodimio, parecen proceder de un manto muy poco empobrecido, quedan representadas más lejos de la geocrona en el diagrama plomo/plomo, lo que indica que la evolución del plomo en el manto es más compleja que la del estroncio y la del neodimio.

tuados a lo largo de la dorsal centro-atlántica septentrional y organizados por Jean-Guy Schilling, de la Universidad de Rhode Island. Aparte de los avances registrados en la obtención de muestras del fondo oceánico se han recabado muestras de islas oceánicas, especialmente en Hawai e Islandia.

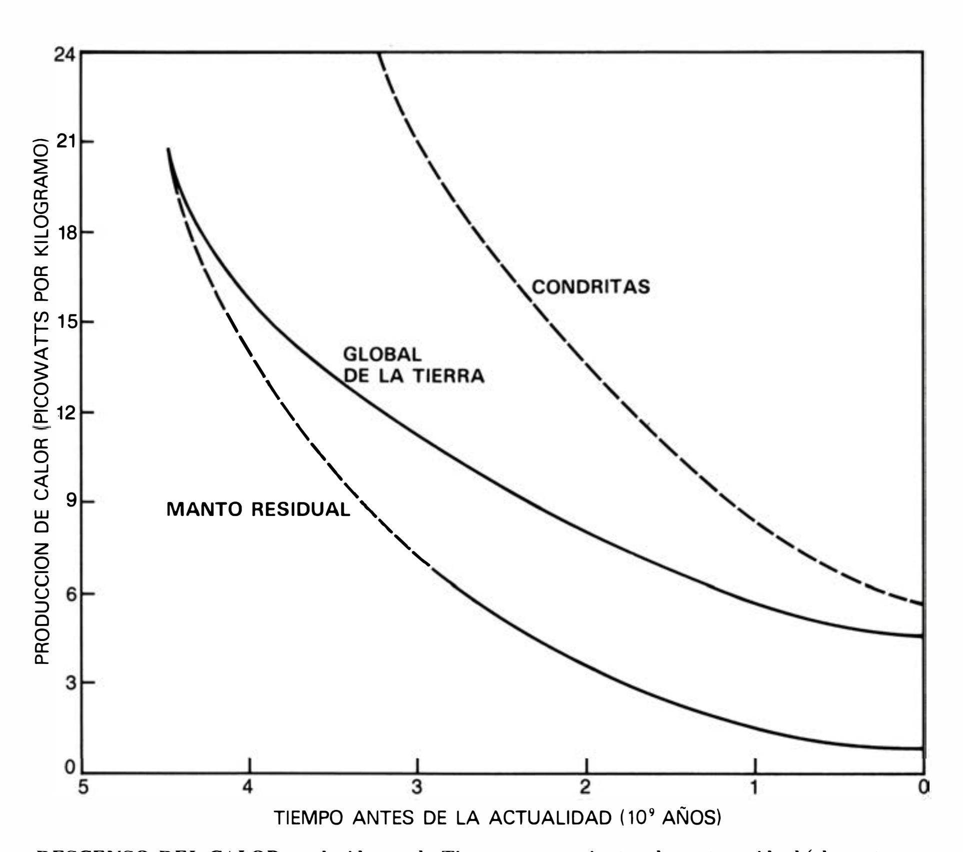
Los progresos más notables en la comprensión de la prehistoria de las regiones fuente de los basaltos oceánicos se debieron, de nuevo, a los análisis isotópicos de estroncio y neodimio realizados en los últimos años. Los análisis realizados en los basaltos oceánicos presentan una dispersión pequeña de los valores correspondientes a las relaciones estroncio 87/estroncio 86 y neodimio 143/neodimio 144, y son comparables a las estimaciones más fidedignas de las mismas relaciones isotópicas de la tierra considerada globalmente (o del manto no diferenciado). Los basaltos de las dorsales oceánicas atlántica, índica y pacífica presentan relaciones isotópicas de estroncio y neodimio inferiores y superiores, respectivamente, a los valores globales de la tierra. El valor inferior de la relación isotópica del estroncio requiere que la región fuente de los basaltos de la dorsal oceánica haya evolucionado con una relación rubidio/estroncio inferior a la de la tierra tomada en su conjunto, o a la del manto indiferenciado, mientras que la elevada relación de los isótopos de neodimio exige que la relación samario/neodimio de la región fuente sea superior a la de la tierra considerada globalmente.

La migración de determinados elementos desde el manto hasta la corteza se ha dejado sentir en la subsiguiente evolución isotópica de aquél. Las relaciones estroncio 87/estroncio 86 y neodimio 143/neodimio 144 de basaltos recientes de las dorsales centro-oceánicas parecen ser del todo compatibles con la hipótesis de que los componentes con una relación de rubidio/estroncio superior y una relación de samario/neodimio inferior a las globales de la tierra hayan sido eliminados, encontrándose en la actualidad en los continentes. Sin embargo, no es posible afirmar de forma categórica, a partir sólo de estos datos, si el empobrecimiento del manto ha sido un fenómeno continuo o episódico. De todos modos, queda claro que el fondo oceánico formado en las dorsales centro-oceánicas deriva de un manto cuya composición isotópica demuestra un empobrecimiento anterior de los elementos litófilos de gran radio iónico.

La relativa uniformidad de la composición isotópica en estroncio y neodimio de los basaltos de las dorsales centro-oceánicas contrasta con la mayor varia-



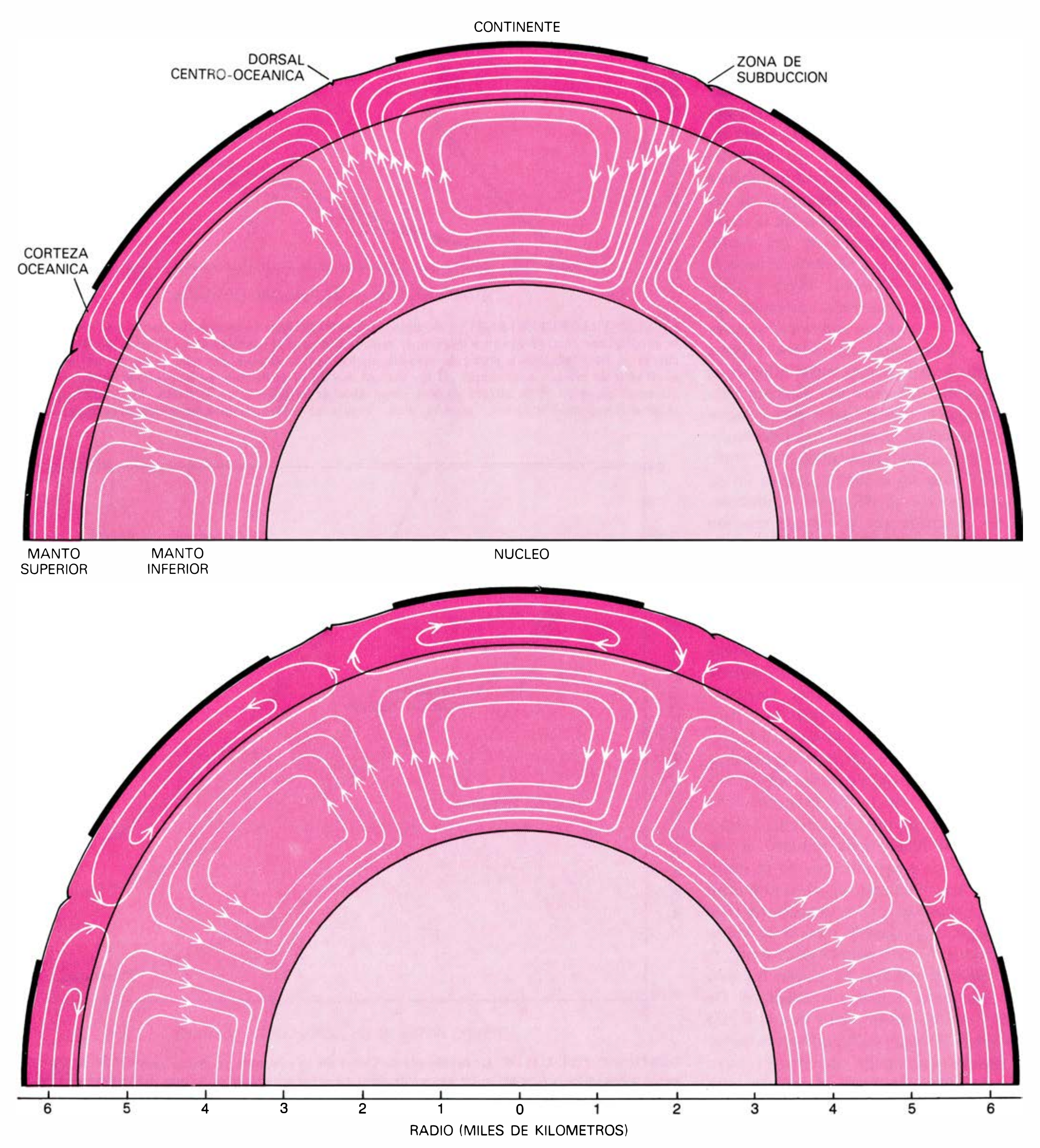
CONCENTRACION SELECTIVA de varios elementos litófilos de gran radio iónico, que inicialmente se encontraban en el manto pero que hoy se hallan en la corteza continental, en función del tiempo. Las curvas se han deducido a partir de cálculos en los que se supone que sólo la mitad del manto es generador de corteza continental. El eje vertical nos da el porcentaje de la cantidad inicial de cada elemento presente en la corteza en una etapa dada de la historia de la tierra. Es evidente que los elementos generadores de calor, potasio, torio y uranio, han sido extraídos del manto de forma eficiente.



DESCENSO DEL CALOR producido por la Tierra en su conjunto, el manto residual (el manto que queda después de la formación de los continentes) y por las condritas, a lo largo del tiempo geológico. Todas las curvas decrecen, puesto que las abundancias de los elementos generadores de calor disminuyen en virtud de los propios procesos de desintegración radiactiva que producen el calor. La producción de calor del manto residual va disminuyendo progresivamente con respecto al del conjunto de la tierra a medida que los continentes se van diferenciando progresivamente del manto. La producción de calor en las condritas, inicialmente alta, decrece más deprisa que en la Tierra. Este fenómeno se atribuye al hecho de que las condritas tienen una relación más elevada que la Tierra de potasio volátil respecto a uranio no volátil. El calor del potasio se produce por la desintegración radiactiva del potasio 40, de vida media más corta que el uranio 238, que genera la mayor parte del calor producido a partir del uranio.

bilidad de estas relaciones isotópicas en los basaltos de las islas oceánicas. En algunos casos, como por ejemplo en la isla volcánica de Tristan da Cunha, los basaltos poseen relaciones de estroncio 87/estroncio 86 y neodimio 143/neodimio 144 muy próximas a nuestras estimaciones de los valores globales de la tierra. Ello implica que su fuente de origen no ha evolucionado de la misma forma que las fuentes que han producido los basaltos de las dorsales centro-oceánicas, pudiendo haber sufrido en el pasado un empobrecimiento mucho menor en constituyentes corticales. Debería hacerse resaltar, sin embargo, que el volumen de rocas volcánicas emitidas en la isla de Tristan da Cunha es muy pequeño comparado con el producido en las dorsales centro-oceánicas. En otros puntos de las cuencas oceánicas, los basaltos de islas, de Islandia y Hawai por ejemplo, tienen composiciones isotópicas de estroncio y neodimio intermedias, que, en parte, coinciden con las de las dorsales centro-oceánicas.

En resumen, pues, existe una fuerte correlación negativa entre las composiciones isotópicas en estroncio y neodimio de los basaltos oceánicos, lo que



UNA IMPORTANTE RESTRICCION a la supuesta convección del manto resulta del descubrimiento de que no más de la mitad del manto, y posiblemente sólo la tercera parte, puede presentar un empobrecimiento en elementos litófilos de gran radio iónico, parecido al de los basaltos emitidos en las dorsales centro-oceánicas. Suponiendo que todo el manto se halle sometido a algún tipo de movimiento convectivo, las células de este tipo no pueden operar en toda la profundidad del mismo (*arriba*). La convección del manto superior debe estar desacoplada de la que tiene lugar en el inferior.

indica una coherencia general de las relaciones padre/hijo durante la extracción de los componentes que hoy en día se encuentran en la corteza continental. Puesto que la relación samario/neodimio, y por tanto la correspondiente a neodimio 143/neodimio 144, de la tierra considerada globalmente está bien establecida en la actualidad, la correlación de las relaciones isotópicas de estroncio y neodimio nos permiten estimar la relación estroncio 87/estroncio 86 en toda la tierra. La comparación de las relaciones isotópicas de neodimio y estroncio, medidas en rocas volcánicas, con los valores predichos para el conjunto de la tierra nos proporciona un excelente método de identificación de regiones que hayan dado origen a un manto empobrecido. La variabilidad de las composiciones isotópicas de los basaltos oceánicos corrobora que la corteza continental no ha sido extraída uniformemente, y que el manto, o al menos la parte del mismo situada bajo las cuencas oceánicas y adecuadamente representada por el vulcanismo de las dorsales centro-oceánicas, está empobrecido en los elementos litófilos de gran radio iónico que actualmente se encuentran en la corteza continental.

Este proceso de empobrecimiento fue puesto de manifiesto en 1968 por Paul W. Gast a partir de consideraciones sobre la abundancia de elementos traza en basaltos oceánicos. La naturaleza heterogénea del manto superior se evidencia igualmente a partir de las mediciones de isótopos del plomo. Cuando comparamos esas mediciones con la composición media predicha de isótopos del plomo en las condritas carbonáceas, la Tierra y la Luna (suponiendo que la Tierra, la Luna y los meteoritos hubieran tenido la misma composición de isótopos del plomo hace 4550 millones de años), resulta que las condritas carbonáceas y otros meteoritos, al representar gráficamente su situación actual, quedan cerca de una línea cuya pendiente corresponde a una edad de 4550 millones de años, siendo de esperar que la Tierra considerada globalmente y la Luna se sitúen también en la vecindad de esa línea. Las posiciones relativas de las condritas carbonáceas, la Tierra y la Luna a lo largo de la línea indica que la relación uranio/plomo de la Luna es mayor que la relación uranio/plomo de la Tierra y mayor que la relación uranio/plomo de las condritas carbonáceas, lo cual está de acuerdo con la observación de abundancias de plomo, relativamente volátil cuando se le compara con el uranio, menores en la Tierra y en la Luna.

Las composiciones en isótopos del plomo de los basaltos oceánicos quedan representadas a la derecha de la línea de los 4550 millones de años, lo que prueba que el manto suboceánico no es homogéneo con respecto a las relaciones isotópicas de plomo ni tampoco respecto a las correspondientes al estroncio y al neodimio. Los basaltos de las islas oceánicas presentan, en sus composiciones, una mayor variabilidad de isótopos del plomo que los basaltos de las dorsales centro-oceánicas, lo cual también es cierto para sus composiciones de isótopos de estroncio y de neodimio. En la actualidad, los datos existentes acerca de los isótopos del plomo, estroncio y neodimio en los basaltos oceánicos son poco adecuados para evaluar completamente las relaciones entre ellos. Sin embargo, lo que sí parece cierto es que deberá recurrirse a un modelo algo más complejo para acomodar las variaciones de las relaciones de los isótopos del plomo ya conocidas. Si bien el examen de los datos isotópicos del estroncio y del neodimio se ha hecho en base a la existencia de dos reservorios (el manto y la corteza continental), resulta que se necesitan tres reservorios para explicar las variaciones en la relación de los isótopos del plomo.

Uno de nuestros fines primordiales al utilizar los isótopos naturales como elementos trazadores del material continental y del derivado del manto fue la evaluación de la época y el ritmo con que se efectuó el suministro de materiales desde el manto hasta la corteza continental, determinando, además, la proporción de manto involucrado en los procesos que han generado la corteza continental. Esta tarea implica, en esencia, un intento de determinar las abundancias comparativas de elementos en la corteza y en una parte del manto en función del tiempo. El problema no puede abordarse únicamente mediante investigaciones realizadas en las rocas derivadas del manto o en la corteza continental, sino que las observaciones y deducciones obtenidas a partir del muestreo de materiales procedentes tanto del manto como de la corteza continental deben hacerse mutuamente compatibles con algún tipo de hipótesis.

El problema lo planteó seriamente por vez primera en 1969 Richard L. Armstrong, de la Universidad de British Columbia. En este primer intento de simular la naturaleza dinámica de la evolución continental se consideró que los continentes habían aparecido en un episodio único, hace aproximadamente unos cuatro mil millones de años, habiendo sufrido posteriormente un reciclaje y un intercambio químico con el manto en el transcurso de un gran número de acontecimientos discontinuos.

El modelo de Armstrong podía reproducir algunas de las características de la química isotópica del manto conocidas en aquellas fechas, pero no resulta compatible con los conocimientos actuales sobre el dispositivo inherente a la acreción cortical.

Recientemente, construimos un modelo de la evolución isotópica del manto basándonos en los tres supuestos siguientes relativos a la evolución continental: (1) Según parece, existe muy poca corteza continental con una edad superior a los 3800 millones de años. (2) Los continentes han sufrido una acreción más o menos continua durante los últimos 3800 millones de años. (3) El ritmo de la acreción continental alcanzó un máximo entre hace 2500 y 3000 millones de años (como se desprende de la distribución regional de la edad de las distintas zonas continentales).

En estos modelos es muy importante tener un conocimiento preciso de la abundancia de los elementos litófilos de gran radio iónico en la corteza continental. Sin embargo, las abundancias en los continentes de estos elementos traza (especialmente de los radiactivos productores de calor) son, debido a su distribución inhomogénea en esos continentes, mucho más difíciles de estimar de lo que podía esperarse. Así, por ejemplo, gracias a estudios de flujo de calor y a muestreos geoquímicos, se ha visto que el potasio, el torio y el uranio se encuentran mucho más concentrados en la parte superior de la corteza que en la inferior.

Para que los modelos sean aceptables, habrán de reproducir también las características isotópicas del manto residual y de los continentes. En un principio, nuestra preocupación principal era reproducir las características isotópicas del estroncio y neodimio de los basaltos de las dorsales centro-oceánicas, ya que estas rocas, debido al gran volumen que representan, proporcionan la mejor estimación de la composición isotópica del manto superior suboceánico. Se originan, además, a partir de la parte más empobrecida del manto, de la que actualmente se pueden tomar muestras gracias al vulcanismo. Los modelos investigados por nosotros suponen una diferenciación continua, con una intensidad del transporte de materiales por el manto que declina en función del tiempo y paralelamente a la disminución de la producción de calor en la tierra. El retraso en la estabilización del material continental, hasta hace unos 3800 millones de años, resulta, presumiblemente, de un reciclaje extraordinariamente eficiente en una época temprana de la historia de la tierra.

La conclusión más importante derivada de este modelo es que no más de la mitad, y quizá sólo un tercio, del manto puede encontrarse tan empobrecido en elementos litófilos de gran radio iónico como la parte que suministra basaltos en las dorsales centro-oceánicas. Esta conclusión, compatible con los hallazgos de DePaolo y Wasserburg, del Instituto de Tecnología de California, impone una restricción importante al tipo de la convección que pudo haberse producido en el manto durante gran parte de la historia de la tierra. Es difícil comprender cómo las células de convección que operaban en el manto pudieron haber actuado hasta producir un empobrecimiento de sólo una parte limitada del mismo. Si, tal como piensan muchos geofísicos, es todo el manto el que interviene realmente en algún tipo de movimiento convectivo, la convección en una parte del mismo (seguramente el manto superior) debe de encontrarse desacoplada de la otra (seguramente el manto superior) debe encontrarse desacoplada de la otra (seguramente el continentes en líneas generales, se ha empobrecido en elementos litófilos de gran radio iónico, pero está mucho más empobrecida en los elementos que generan calor (potasio, torio y uranio), que en estroncio, neodimio y samario.

Este último aspecto puede demostrarse representando, en función del tiempo, el porcentaje de elementos litófilos de gran radio iónico presentes en un principio en el manto, si bien se encuentran ya en los continentes [*véase la ilustración superior de la página 75*]. Alrededor de un 70 por ciento del potasio, torio y uranio que se encontraba originalmente en lo que hoy en día es el manto residual se ha transportado hasta los continentes. De ahí que la producción intrínseca de calor en dicho manto residual haya disminuido más aprisa que si no se hubiera producido la diferenciación química de los continentes. A pesar de que el manto residual tiene en la actualidad una producción de calor propio muy pequeña, continúa funcionando como el principal sumidero de calor de la tierra durante la formación y enfriamiento de las placas generadas a lo largo de las dorsales centro-oceánicas. El calor disipado durante este proceso procede, en parte, de la desintegración radiactiva de los elementos traza existentes en zonas menos empobrecidas de la tierra (quizás en el manto inferior), y en parte del calor liberado por el enfriamiento general de la tierra que, aún sin haber sido determinado con precisión, representa una cantidad de significativa importancia.

Cinemática del crecimiento vegetal

Al igual que la llama o la estela de una embarcación, la forma de un vegetal va cambiando con lentitud aunque sus componentes fluyen sin solución de continuidad. Ello posibilita el análisis de sus movimientos en términos de flujo

Ralph O. Erickson y Wendy Kuhn Silk

La belleza de las formas vegetales ha deleitado e inspirado a poetas, artistas y científicos a lo largo de la historia. La forma cónica de la pícea, la graciosamente irregular del roble, la simetría radial casi perfecta de muchas flores, la regularidad matemática de una piña o de una cabezuela de girasol y la característica forma de una hoja de arce o de hiedra pertenecen a la conciencia colectiva humana. A primera vista quizás sea menos obvio que las formas, o por lo menos las dimensiones, de muchas partes de una planta estén cambiando continuamente a lo largo de su vida. Una fotografía de una planta de judía tomada hoy presentará ligeras diferencias respecto a otra que se tomó ayer o se sacará mañana. Un análisis de estos cambios revelará regularidades del desarrollo tan sorprendentes como las simetrías de la forma madura.

Si observamos detenidamente una planta en crecimiento, descubriremos muy pronto que a lo mejor no cambia de posición una hoja o una rama de la parte inferior del tallo (o una marca allí incisa) aunque la altura del vegetal aumente a un ritmo considerable. La razón estriba en que el crecimiento está limitado a la región del ápice; es decir, el crecimiento en longitud sólo se da cerca del extremo superior del tallo. Una hoja o una marca colocada por debajo de este extremo, dentro todavía de la región de crecimiento, cambiará su posición tanto con respecto al ápice como con respecto al suelo.

De esta sencilla observación se desprende que los tejidos vegetales en crecimiento aumentan de tamaño y cambian simultáneamente su posición con respecto a las restantes partes de la planta. Queda asimismo claro que si uno estuviera interesado en el comportamiento de las células de la región de crecimiento, no sería posible determinar la tasa de cambio, con respecto al tiempo, de una variable celular en una determinada posición en el espacio, pues la célula se desplazaría durante el período de tiempo necesario para efectuar la determinación. Hace falta un método de análisis suficientemente sutil para tomar en cuenta tanto el desplazamiento como la expansión de los elementos tisulares.

Importa también considerar ambos aspectos del crecimiento (el desplazamiento y la expansión de los elementos del tejido) al estudiar un vegetal bajo el microscopio y al investigar la composición química y el metabolismo del tejido en crecimiento. Suele ocurrir que, por exigencias del estudio, haya que matar el tejido, lo que cierra el paso a observaciones directas de su crecimiento. No obstante, pueden encontrarse a menudo métodos indirectos para interpretar los resultados analíticos en función de los procesos que tienen lugar en el tejido en crecimiento.

A la hora de estudiar el comportamiento de un líquido compresible nos enfrentamos también con un sistema cuyos elementos se están desplazando y expandiendo (o contrayendo). Ese dato va a permitirnos establecer una analogía entre el crecimiento de un vegetal y el flujo de un líquido. En cada caso se puede suponer la existencia de un medio continuo (el líquido o el tejido en crecimiento) que contiene un campo de velocidades locales que pueden diferir una de otra dentro del medio y con el tiempo. A escala atómica, un líquido no es un continuo, pero a escala microscópica y a otras mayores la suposición de continuidad está justificada en el terreno estadístico. La suposición ha hecho posibles muchas generalizaciones importantes en la dinámica de los fluidos.

Los tejidos vegetales son mucho más complejos que los fluidos de la mecánica clásica. Un tejido vegetal consta de diversos tipos de células que son por sí mismas muy complejas. No obstante, muchos órganos vegetales están formados por gran número de células que hasta cierto punto presentan gradaciones continuas de tamaño y de otras propiedades. Además, las paredes de las células están cementadas unas con otras según una red poliédrica que parece expandirse de una manera coordinada. El curso del crecimiento en el tiempo parece también ser continuo, según puede observarse en series de imágenes tomadas a intervalos, en fotografías de exposición múltiple y en fotografías continuas ("streak photographs"). (Una fotografía continua se realiza mediante una cámara en la que se deja abierto el obturador mientras la película se desplaza a velocidad constante.)

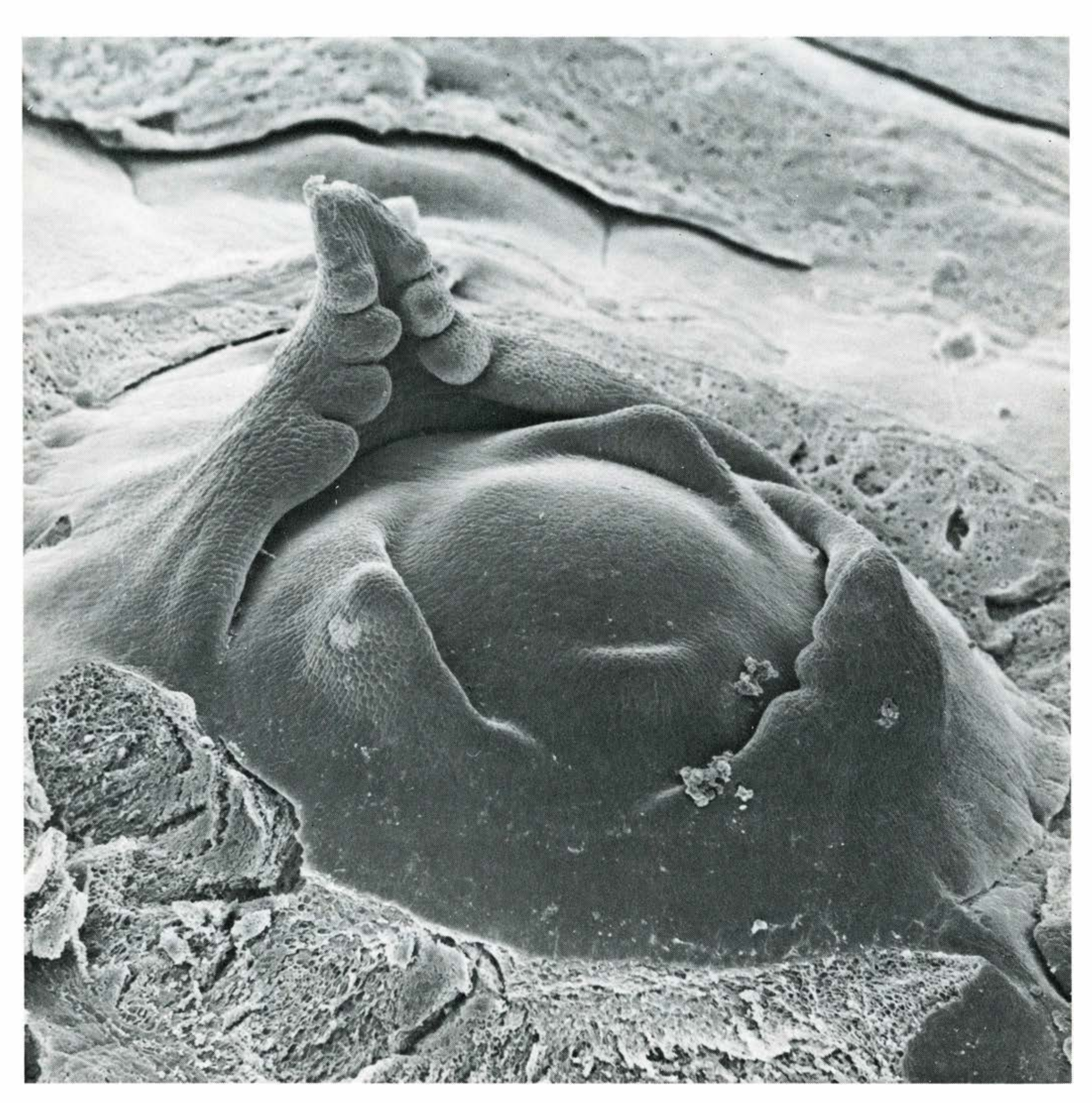
Si la analogía entre el flujo de un líquido y el crecimiento del tejido vegetal resulta ser legítima, los métodos matemáticos de la analítica clásica estarán a nuestra disposición, como lo están para la dinámica de fluidos. Es de esperar la aparición de generalizaciones importantes acerca de la morfogénesis de los vegetales. Se dispondrá asimismo de potentes métodos para el análisis de los datos experimentales. Es interesante notar que en la dinámica de fluidos se reconocen diversos modelos de flujo sorprendentes y bien caracterizados, entre ellos las corrientes naturales, estelas, vórtices y ondas estacionarias, todos ellos relacionados de forma altamente específica con las condiciones del flujo y con las fuerzas que intervienen en el mismo. De esa analogía cabe esperar que algunas estructuras o modelos morfológicos vegetales bien conocidos puedan relacionarse, y probablemente explicarse, a partir de las características de los procesos del crecimiento que los originan.

En la dinámica de fluidos se establece una distinción importante entre cambios espaciales y materiales. Los cambios espaciales, o locales, se dan en una posición determinada del espacio; los cambios materiales pertenecen a los elementos físicos (las moléculas) del fluido. Se puede apreciar esta distinción considerando una cascada o la estela de una embarcación. Su aspecto y dimensiones se pueden describir en términos espaciales, y la descripción puede ser válida du-

rante cierto tiempo. Los elementos materiales, las moléculas de agua, son, sin embargo, transportados continuamente a través de la estructura. Los datos experimentales, por razones prácticas, se obtienen normalmente en términos locales, es decir, con referencia a coordenadas definidas: señales geográficas para una cascada y, en nuestro segundo ejemplo, las dimensiones de la embarcación en movimiento. Si se mide una variable que sea función de la posición y del tiempo, puede determinarse su ritmo de cambio espacial. Si se conocen las velocidades locales del fluido, puede determinarse el ritmo de cambio material.

Prosiguiendo en nuestra analogía, diríamos que conviene también hacer una cuidadosa distinción entre cambios locales y materiales al estudiar la morfogénesis, el crecimiento y la fisiología de los tejidos vegetales. Desde el punto de vista experimental, es más factible tomar una medida a, digamos, cuatro milímetros del ápice de un brote y analizar los datos en estos términos. Los datos de que se dispone sugieren que ésta es una vía válida e ilustrativa de describir el proceso del crecimiento.

Los biólogos atribuyen también una gran importancia a la organización celular de los tejidos. Puede decirse que las células son los constituyentes materiales de un organismo. Tanto la estructura como la función del organismo se explican en gran parte en términos de la estructura y función de sus células. La especificación material de cambio en el tejido en crecimiento se correspondería pues estrechamente con los cambios celulares. En el análisis del desarrollo ve-

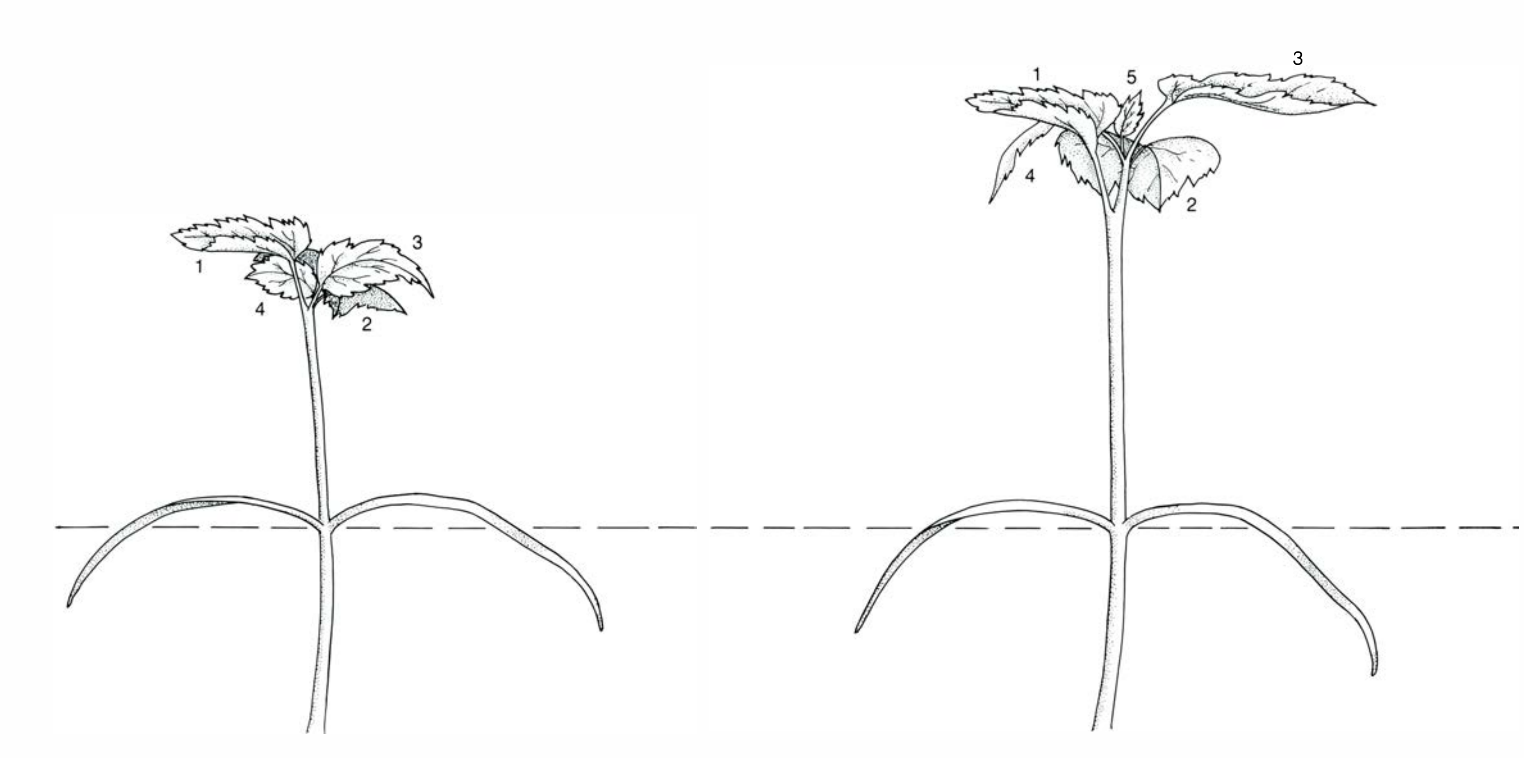


APICE DE UNA PLANTA DE APIO, el punto donde se originan las nuevas hojas de la planta, visible bajo la forma de la estructura central a modo de domo en esta electromicrografía de barrido obtenida por Roger D. Meicenheimer, de la Universidad estatal de Washington. El ápice está rodeado por estructuras en cresta, cada una de las cuales es una hoja joven. Cuanto más cerca está una hoja del ápice, tanto más joven es. Si la temperatura es constante, las nuevas hojas aparecen a iguales intervalos de tiempo (intervalo denominado plastocrono). La micrografía, cuyo aumento es de 130 diámetros, se preparó cortando las hojas de un troncho de apio hasta poner el ápice al descubierto. El conjunto, seco, se cubrió con oro.

getal deberían considerarse aspectos tanto locales como materiales. Por desgracia, la mayoría de estudios celulares se basan en tejidos fijados, y se interpretan sin disponer de información relativa a las velocidades de crecimiento o con meros supuestos intuitivos acerca del mismo. Ilustraremos por qué vale la pena considerar la expansión y el desplazamiento de los elementos tisulares y los aspectos materiales y espaciales del crecimiento con unos pocos ejemplos; apuntaremos luego algunas relaciones generales que nos vienen sugeridas por estos estudios.

El hecho está perfectamente registrado en el crecimiento de la raíz, el análisis de cuyos pormenores se hizo factible fotografiando las células de la superficie de raíces vivas a intervalos de media hora (según llevó a cabo Richard H. Goodwin y Charlotte J. Avers, en el Connecticut College) y mediante refinados experimentos de marcado que los autores de este artículo realizaron. En esos experimentos, se marcó la raíz de una plántula de maíz pincelándola con una suspensión de negro de humo y se colocó luego en una cámara húmeda a una temperatura de 25 grados Celsius. Se enfocó su imagen sobre la abertura de la cámara fotográfica de impresión continua. Con el obturador siempre abierto, la película avanzando y la luz débil y constante, se tomó una fotografía continua que registró el desplazamiento hacia abajo de las marcas a través de la región de crecimiento de la raíz durante un determinado período de tiempo. Cuando la cámara está calibrada para tiempo y escala, una fotografía de este tipo es un trazado detallado y automático del crecimiento de la raíz. El tiempo está representado horizontalmente y la distancia a lo largo de la raíz lo está verticalmente. Las pendientes de las líneas representan las velocidades de desplazamiento y pueden medirse con un transportador.

Es conveniente considerar una transformación de este trazado en el que se toma el ápice radicular como origen del eje longitudinal, midiéndose luego velocidades de desplazamiento a partir del ápice, más que velocidades hacia abajo. La definición del ápice como ori-



PLANTA DE *Xanthium pensylvanicum* en crecimiento representada según fotografías tomadas a intervalos en una cámara de crecimiento. La planta se muestra tal como aparecía a las 10,00 de la mañana de los días 13, 15, 17 y 19 después de sembrada la semilla. Las hojas están numeradas para facilitar su identificación en cada dibujo. Los cotiledones, las hojas germinales cercanas a la base de la planta, se han colocado arbitrariamente al mismo nivel en cada figura. Las plantas se sembraron en una maceta con una mezcla de vermiculita y trocitos lavados de granito y se regaron diaria-

gen está de acuerdo con la histología (organización tisular) de la raíz, pues las células radiculares se originan a partir de células iniciales del ápice del meristemo: la zona de crecimiento. Cuando las velocidades de desplazamiento se representan en función de la distancia desde el ápice de la raíz, se ve que aumentan de cero, a nivel del ápice, hasta un máximo de casi dos milímetros por hora a unos nueve milímetros del ápice. (Los nueve milímetros marcan el límite superior de la región de crecimiento.) Esta velocidad máxima de desplazamiento es idéntica al ritmo de crecimiento normalmente citado para la raíz entera.

Una fotografía continua contiene también información acerca de la expansión longitudinal de los elementos de la raíz. En una gráfica de velocidades de desplazamiento respecto a la distancia desde el ápice, la pendiente de la curva en cada punto da el ritmo de cambio de velocidad con respecto a la posición. Este es el gradiente de velocidad; nosotros lo denominamos ritmo elemental relativo de elongación. También se llama ritmo de deformación local y puede considerarse como la divergencia de velocidad en una dimensión. En un trazado típico, el ritmo relativo elemental de crecimiento crece de cero a nivel del ápice radicular al valor notablemente alto del 40 por ciento por hora a cuatro milímetros aproximadamente del ápice, decreciendo de nuevo hasta cero a unos nueve milímetros.

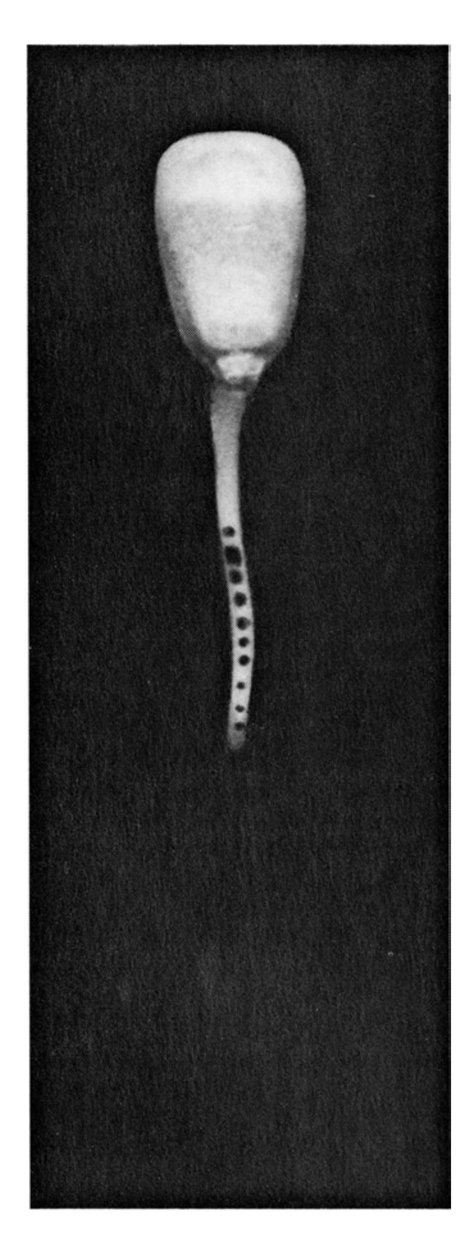
Es instructivo comparar este análisis con los experimentos clásicos de marcado de raíces. En 1758, el ingeniero y agrónomo francés Henri Louis Duhamel du Monceau, escribiendo sobre la estructura de los árboles, habló de insertar finos alambres de plata en las raíces de plantones de nogal y observar después de varias horas que los alambres situados junto al ápice quedaban muy separados, mientras que los que originalmente se colocaron a unos pocos milímetros del ápice mantenían sus posiciones relativas. Alrededor de 1860 el botánico alemán Julius von Sachs marcó con tinta china segmentos consecutivos de un milímetro en raíces de habas, midiéndolos después de haber crecido 24 horas a una temperatura de 20 grados

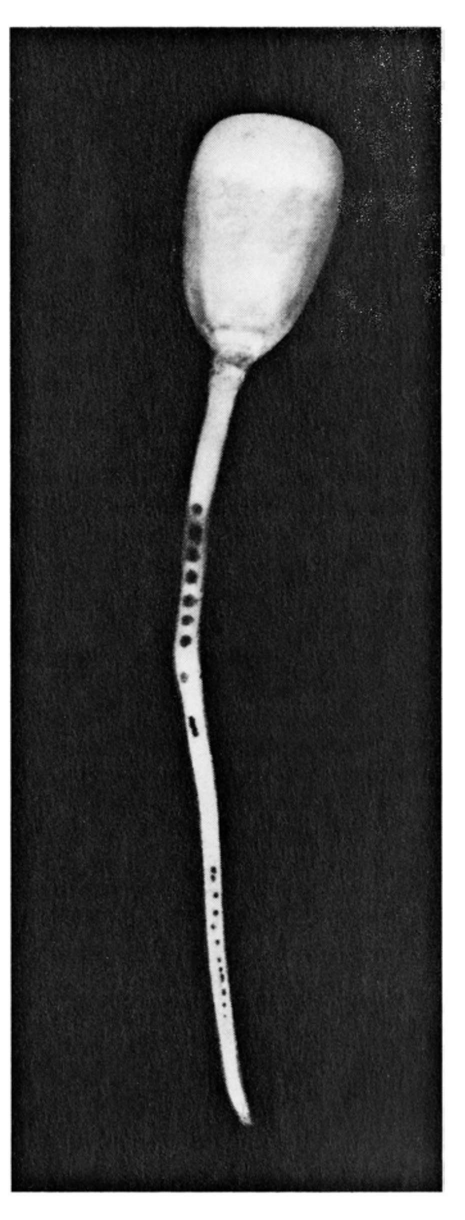


mente con una solución mineral nutriente. Las luces de crecimiento (bancos de lámparas fluorescentes) se conectaron diariamente desde las ocho de la mañana hasta medianoche, excepto a intervalos de 17,36 minutos en que se desconectaban brevemente para encender las luces fotográficas a fin de realizar una toma. Las luces fotográficas se encendieron durante el mismo intervalo en el período diario de ocho horas de oscuridad. Puesto que *Xanthium* es una planta de día corto y sólo florece si recibe por lo menos 8,5 horas de oscuridad total diaria continua, el crecimiento fue vegetativo.

Celsius. Sus hallazgos, citados a menudo, fueron que los diez primeros segmentos crecieron un total de 22,8 milímetros, distribuidos (empezando por el ápice) así: 1,5; 5,8; 8,2; 3,7; 1,4; 1,1; 0,4; 0,3; 0,2 y 0,2. En otras palabras, el segundo y tercer segmentos eran los que más se habían elongado y los segmentos más alejados del ápice mostraban un aumento de longitud progresivamente inferior. La raíz en conjunto crecía a casi un milímetro por hora.

Muchas generaciones de estudiantes de botánica han repetido el experimento de von Sachs y se les ha forzado a concluir que el ápice de la raíz, donde pueden verse células en fases mitóticas (dividiéndose) bajo el microscopio, es el que crece más rápidamente. Se descubre, no obstante, una gran discrepancia entre esta conclusión y la obtenida a partir de una fotografía continua. Si el experimento de von Sachs se practicara sobre una raíz de maíz, las posiciones de las marcas 24 horas más tarde sugerirían que la tasa de crecimiento es mayor en el segundo milímetro después del ápice, que está a unas cuarenta longitudes celulares del lugar donde la elongación presenta la tasa máxima. La región de máximo ritmo de deformación local está alejada de la región de división celular. La discrepancia ocurre por lo siguiente: en los experimentos clásicos, el aumento de longitud de un segmento marcado (un incremento material) se asignaba a la posición inicial (espacial) del segmento, atribuyendo así a la posición inicial un crecimiento que de hecho tenía lugar más lejos del ápice. Si se hubiera intentado un análisis riguroso, la prolongada duración del experimento y la longitud relativamente grande los segmentos habrían hecho difícil la obtención de buenas estimaciones de las velocidades instantáneas y del comportamiento de los elementos de longitud.



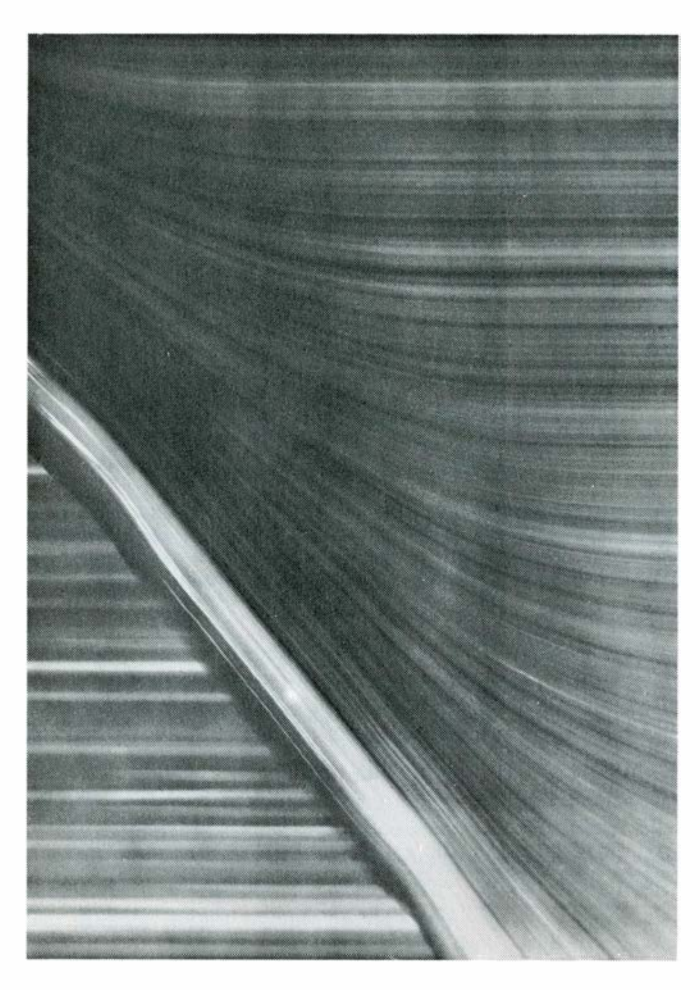


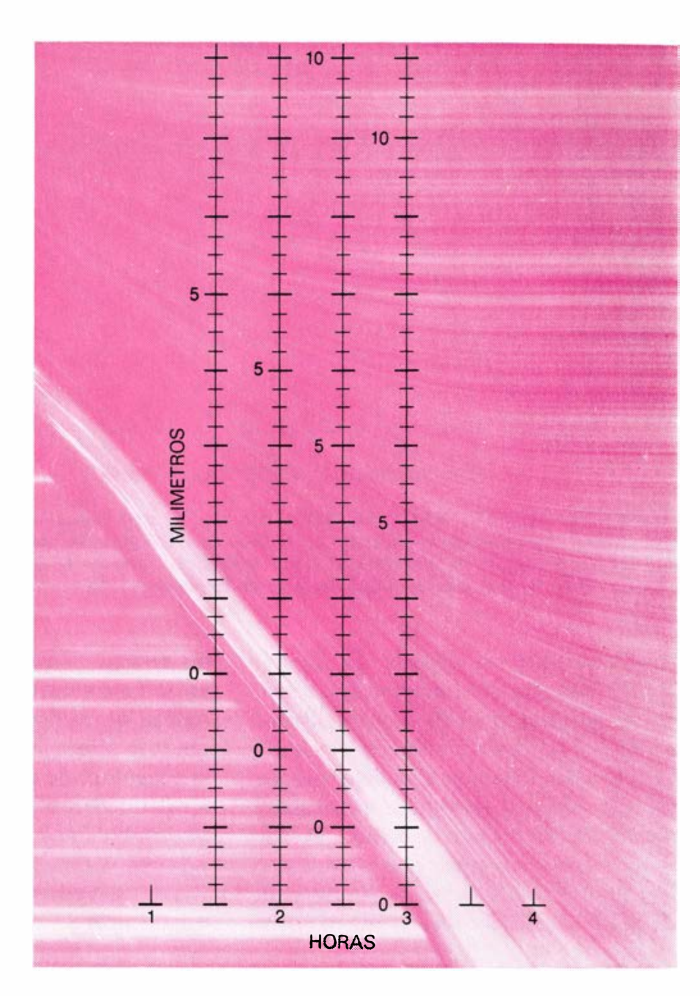
PLANTULA DE MAIZ mostrada en fotografías realizadas justo después de que se marcara la raíz con diez señales separadas entre sí un milímetro (*izquierda*) y catorce horas más tarde (*derecha*). Puede verse en la segunda fotografía que las marcas de tinta se han expandido y desplazado. Las marcas se separaron durante el crecimiento de la raíz y es evidente que la mayor separación esté entre marcas cercanas al ápice. La interpretación clásica del crecimiento radicular se basaba en pruebas de este tipo.

Una raíz de maíz crece linealmente, esto es, a un ritmo global casi constante, durante muchas horas. Las fotografías continuas registradas en diferentes momentos del período de crecimiento lineal muestran relaciones esencialmente idénticas de velocidades de desplazamiento y ritmos relativos elementales respecto de la distancia al ápice. Adoptando una expresión de la dinámica de fluidos, se puede decir que el crecimiento es constante, lo que significa que las tasas de crecimiento local son invariables con el tiempo. El crecimiento constante estaba con toda probabilidad implícitamente supuesto por los que realizaron los experimentos clásicos de marcado de raíces. Quizá sea cierto también que los anatomistas vegetales aceptaran intuitivamente el crecimiento constante al presentar una ilustración de un corte longitudinal de una raíz en representación de la estructura de la raíz en general, sin mencionar la longitud o la edad de la misma.

Los morfólogos clásicos creían que el curso del desarrollo celular resultaba evidente a partir de esta sección longitudinal. La distancia desde el ápice correspondía a la edad de desarrollo. Cabía, por tanto, inferir la historia de una célula dada examinando células más jóvenes, más cercanas al ápice, y predecir el destino de la célula a partir de las características de células más viejas, alejadas del ápice.

Implicación del crecimiento constante es que debería distinguirse entre las especificaciones espaciales y materiales de las variables. Por ejemplo, las tasas de crecimiento local no varían con el tiempo, mientras que cada elemento material se expande, primero más y luego menos rápidamente, con el tiempo al desplazarse respecto al ápice radicular. De manera similar, hay aspectos espaciales y materiales de la morfología. En particular, cuando el crecimiento es constante, puede decirse que la región de crecimiento de la raíz es una estructura espacial o geométrica; puede describirse o representarse en términos de zonas de división celular, diferenciación celular, etcétera, a distancias fijas del ápice. Por otro lado, los elementos materiales (las células) de que consta la región se desplazan continuamente: puede decirse que fluyen a través de la región de crecimiento.





CRECIMIENTO DE LA RAIZ DEL MAIZ registrado en una fotografía continua. La raíz se pinceló con una suspensión de negro de humo y se colocó en una cámara húmeda montada frente a una máquina fotográfica. El obturador de la máquina se mantuvo continuamente abierto a la vez que se desplazaba la película a velocidad constante detrás de una hendidura vertical. Las manchas negras de la raíz en crecimiento aparecen formando bandas en la fotografía resultante. En un momento determinado, como se muestra mediante cada una de las escalas verticales, el cero señala la punta de la raíz. Las distancias a lo largo de la raíz se indican por la escala en milímetros. Las velocidades de desplazamiento de las marcas en un momento dado vienen recogidas por las pendientes de las bandas que cortan la línea vertical. Se aprecia claramente que el crecimiento es casi constante.

Si se conoce la distribución de la tasa de crecimiento relativo elemental, se pueden evaluar las tasas o ritmos de muchos procesos del desarrollo. Por ejemplo, el ritmo relativo de división celular puede sustraerse de la tasa de crecimiento local, relativo y elemental para obtener la tasa relativa de cambio, en la longitud celular promedio, en el elemento material en movimiento. De esta manera puede verse que la distribución constante de longitudes celulares en la raíz resulta de los procesos simultáneos de división celular y expansión local.

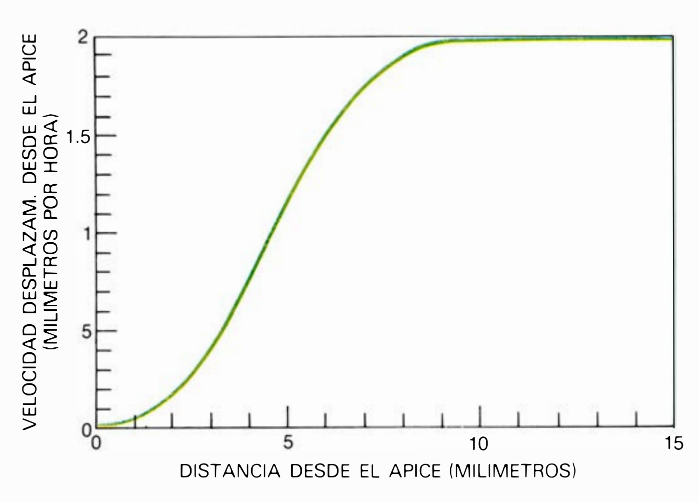
Durante la germinación de las semillas de muchas plantas de hoja ancha aparece otra estructura espacial o geométrica. En una plántula joven el extremo del tallo crece a menudo con una pronunciada curva o gancho, que se cree protege al meristemo apical de cualquier daño cuando la plántula empuja a través del suelo. Llegado a la superficie, el tallo suele enderezarse. No obstante, si la plántula se desarrolla con luz de baja intensidad, el gancho puede mantenerse durante un largo tiempo después de que el tallo haya emergido del suelo y continúe creciendo.

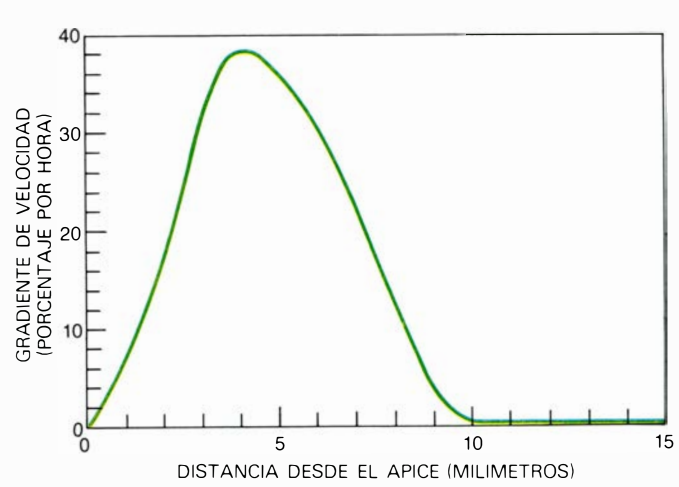
Un sencillo experimento de marcado revela que el gancho es otro ejemplo de órgano vegetal compuesto por elementos cambiantes. Se coloca una marca en el lado apical del gancho; el desplazamiento de aquella por la región curvada puede verse en la porción basal recta al cabo de ocho horas. La marca se halla firmemente unida a las células de la superficie del tallo. Esta observación implica que los elementos de un tallo se curvan primero para enderezarse luego conforme se alejan del ápice del tallo. En cualquier momento el gancho se compone de elementos que se están curvando (en el lado apical del gancho) y de otros cuya curvatura está menguando (en el lado basal).

Las observaciones de la distribución de las tasas de crecimiento se ajustan a este modelo. Un elemento del tallo se curva si un lado del tallo crece más deprisa que el otro; un segmento curvo se endereza si la superficie interna crece más rápidamente que la externa. Si *A* representa un punto del lado apical del gancho y *B* un punto del lado basal, se advierte que la tasa de crecimiento elemental relativa disminuye de fuera adentro del gancho en *A*, donde los elementos están aumentando en curvatura, y decrece de dentro afuera del gancho en *B*, donde los elementos se están enderezando. Se crea así una estructura estable mediante una distribución bastante compleja de la tasa de crecimiento. La estructura presenta una curvatura local constante, pero las curvaturas materiales cambian con el tiempo.

Hemos examinado principalmente el crecimiento con respecto al desplazamiento a lo largo de un eje, tal como el longitudinal de una raíz. Las mediciones son unidimensionales. Se ha empezado a analizar el crecimiento en dos dimensiones, pero apenas se ha intentado un análisis tridimensional del crecimiento en los términos que hemos descrito.

En las plantas de hoja ancha el crecimiento del limbo de la hoja puede describirse bien en dos dimensiones, pues





DISTRIBUCION DEL CRECIMIENTO de una raíz de maíz representado a partir de fotografías continuas. En la zona de crecimiento de una raíz las marcas negras se desplazan al crecer aquella; la curva de la izquierda refleja la velocidad de desplazamiento de las marcas a diferentes distancias del extremo radicular en un momento preciso. La curva de la derecha refleja la expansión de las células en la región de crecimiento, esto es, la tasa de cambio de la velocidad de crecimiento con respecto a la distancia al ápice, o también, la tasa relativa elemental de elongación.

su crecimiento en espesor es mínimo comparado con su aumento en superficie. El modelo difiere totalmente del seguido por un órgano cilíndrico, una raíz por ejemplo. Una hoja está determinada, es decir, alcanza un tamaño previsible y luego deja de crecer. Además, es más probable que su simetría sea bilateral y no radial. En una hoja, un cambio dado de perfil puede producirse por gradientes de dirección así como por gradientes en la magnitud de la tasa relativa elemental de crecimiento. Por consiguiente, tanto la dirección del crecimiento como la magnitud de las tasas de crecimiento locales deben evaluarse en un análisis de desarrollo foliar, como lo hicieron por primera vez en 1945 Oscar W. Richards y A. J. Kavanagh, de la American Optical Company.

El detallado patrón de las nerviaciones en una hoja proporciona gran cantidad de puntos identificables que pueden reconocerse en fotografías sucesivas de la misma hoja. En un estudio del crecimiento de las hojas de *Xanthium* realizamos conjuntos de tres fotografías. Se registraron las coordenadas x e y de unos 250 puntos en cada una de las fotografías con un equipo digital asistido por

DISCREPANCIA entre los experimentos de marcado clásicos y el análisis por fotografía continua. Esa falta de ajuste viene señalada por conjuntos de barras que muestran, para 24 horas, seis horas y una hora, el aumento de longitud medio por hora (expresado en milímetros) de cada segmento de un milímetro de una raíz de maíz. La línea negra asociada a cada conjunto de tres barras representa la tasa relativa de crecimiento del segmento, calculado por fotografía continua. La discrepancia se acorta a medida que se estrecha el intervalo de tiempo del experimento de marcado. Si se quiere precisión en el análisis, éste deberá referirse entonces a segmentos infinitésimamente pequeños y a unidades de tiempo infinitésimamente pequeñas.

ordenador y se hicieron los cálculos de los componentes de velocidad en cada punto y también de la divergencia de la velocidad, que puede calificarse de tasa relativa elemental de aumento de superficie.

Se aprecian grandes diferencias de divergencia de una parte de la hoja a otra. A los tres días, el ápice de una hoja típica parcialmente desarrollada ha dejado esencialmente de crecer pero los lóbulos de la base se están expandiendo en superficie a un ritmo de casi el 80 por ciento por día. Se ha correlacionado subjetivamente estos resultados con la observación histológica de que el ápice de una de estas hojas se ha diferenciado en su estructura madura en un momento en que los tejidos de la base aún están indiferenciados.

Dado que la forma de la hoja cambia durante el crecimiento, es evidente que éste no puede considerarse constante. Para una descripción completa del proceso en términos espaciales y materiales sería necesario evaluar las velocidades de crecimiento muchas veces durante la expansión de la hoja. No fue esto lo que hicimos. Examinamos la direccionalidad del crecimiento en el estadio de semiexpansión, separando la divergencia en cada punto en sus componentes con el fin de demostrar su magnitud en las direcciones de expansión lineal máxima y mínima. Resultaron formar ángulos rectos y en general no diferían mucho. En otras palabras, a pesar de la heterogeneidad del crecimiento foliar éste es bastante isótropo; el cambio de forma se produce por el pequeño grado de anisotropía y por notables gradientes en la magnitud de la velocidad de deformación. Hay que hacer hincapié en que sólo se ha dado un primer paso hacia el análisis del crecimiento en superficie y por tanto hacia la comprensión de los procesos de crecimiento que conducen a las hermosas formas regulares de las hojas y de otras muchas estructuras vegetales.

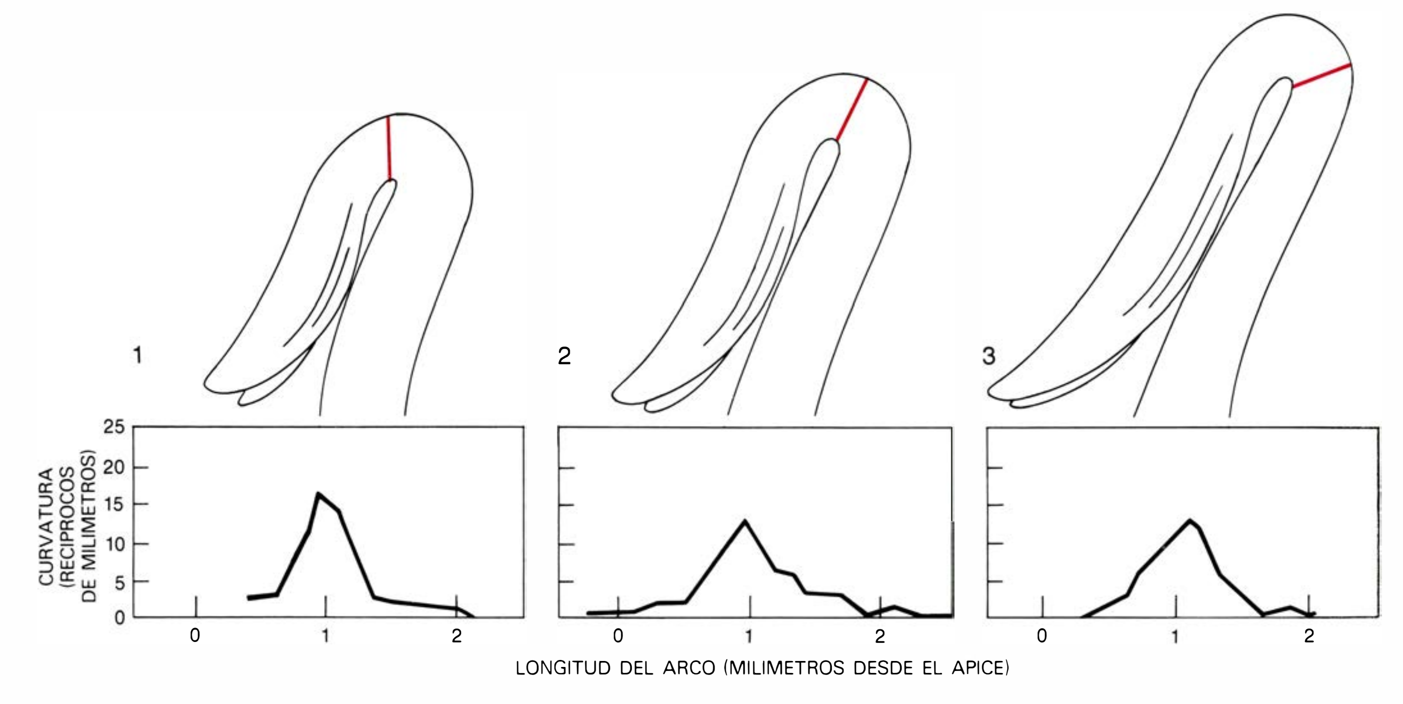
El crecimiento de un brote es bastante más complejo que el de una raíz, una plántula o una hoja. Hay que reconocer no sólo que la porción apical del tallo aumenta en longitud, sino también que periódicamente se forman nuevas hojas en el meristemo apical del brote. Las nuevas hojas crecen de una manera coordinada en el tallo. (Otras complicaciones surgen con el florecimiento y la fructificación y con los periodos de inactividad y el crecimiento estacional, pero las ignoraremos.)

Pueden encontrarse notables regularidades en el crecimiento vegetativo de un brote que son tan interesantes e importantes como los modelos que ya hemos discutido. Es difícil observar el crecimiento del ápice de un brote pues las hojas jóvenes están apiñadas y cubren el domo apical. Normalmente deben extraerse para poder ver o fotografiar el ápice. Puede cuestionarse si su crecimiento es normal después de esta operación. No obstante, una buena manera de comprender la morfología del ápice de un brote es disecar una planta de apio.

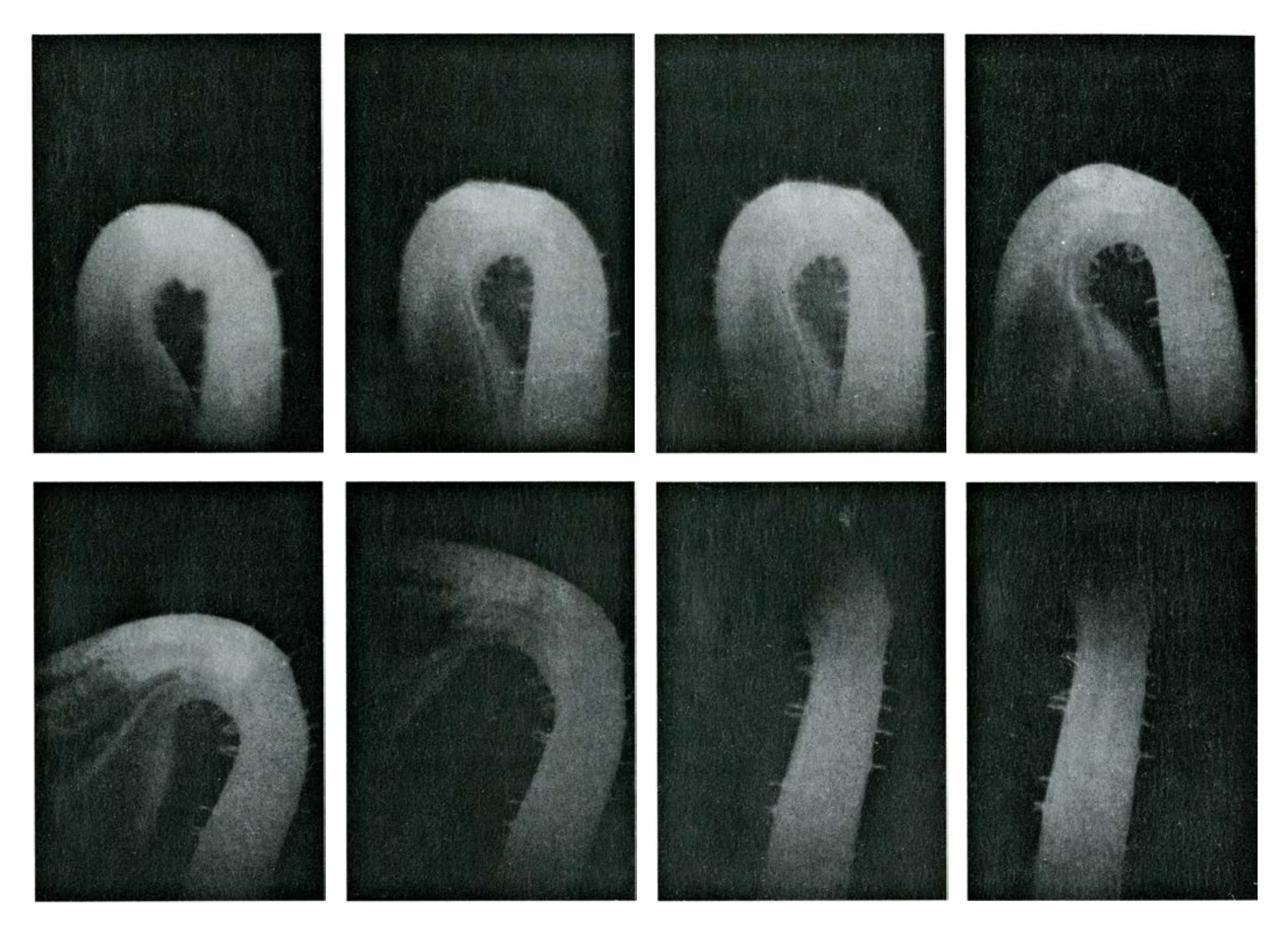
Los tronchos del apio son los peciolos, o pedúnculos foliares de sus hojas compuestas. Las hojas más viejas de la parte externa de la planta pueden cortarse en su base con un cuchillo. En el interior hay hojas progresivamente más jóvenes, más pequeñas y más pálidas, que también pueden extraerse. Ahora, el ápice parcialmente diseccionado puede observarse en la lupa binocular o con una lupa de mano.

Al ir sacando con un fino bisturí las hojas jóvenes (de 10 a 20 milímetros de longitud) se puede empezar a ver el ancho meristemo apical, que tiene una ligera forma de domo, de donde se originan las hojas. Está rodeado por hojas primordiales, progresivamente más jóvenes cuanto más cerca están del centro del ápice. Algunas de ellas semejan manos con dedos verdes y traslúcidos. Los dos o tres primordios más jóvenes son simplemente protuberancias del domo apical.

Si el ápice diseccionado se mantiene sobre un papel de filtro húmedo durante uno o dos días, y se evitan las infecciones fúngicas, cabe la posibilidad de observar el desplazamiento de los jóvenes primordios, que se alejan del centro a medida que crece el brote. Incluso puede llegar a verse el inicio de un nuevo primordio foliar. Este primordio aparece primero como un reflejo brillante en un punto previsible (a unos 137,5 grados del último primordio visible) y pronto se convierte en una protuberancia de la superficie. La superficie de la porción desnuda del ápice está ahora en su mí-



PLANTULA DE LECHUGA cultivada con luz de baja intensidad representada a intervalos de dos horas. El modelo espacial de la curvatura no cambia bajo estas condiciones, como se desprende de las gráficas (*parte inferior*) que representan la curvatura respecto de la distancia al ápice. El punto de máxima curvatura permanece alrededor de un milímetro detrás del ápice. Se observa cómo una marca asociada a un grupo de células se desplaza por el tallo en la curva. (La línea de color representa la marca.) La geometría invariable está generada en este caso por elementos cambiantes.



MODELO DE CRECIMIENTO de una plántula de lechuga cultivada con luz intensa, revelado en fotografías tomadas durante un período de 28 horas. El tallo en crecimiento sale del suelo en forma curvada, que puede conservarse si se mantiene la luz a baja intensidad mientras crece la plántula. Las fotografías muestran la plántula a las 0, 2, 10, 12, 14, 16, 20 y 28 horas (*de izquierda a derecha*). A las 14 horas, el tallo se endereza. En contraste con el crecimiento de las raíces y plántulas con luz de baja intensidad, este modelo de crecimiento no es constante, pues varía con el tiempo.

nimo. El domo continúa creciendo, desplazando del centro al nuevo primordio, e iniciándose una nueva hoja. En el crecimiento vegetativo típico este proceso se repite a intervalos de tiempo iguales si la temperatura es constante. Este intervalo de tiempo entre la formación de hojas sucesivas se denomina plastocrono, término propuesto en 1880 por el botánico alemán Eugen Askenasy, que había estudiado con von Sachs.

Una consecuencia de este modelo de crecimiento es que la porción en crecimiento de un brote vegetativo contiene una sucesión de hojas de distintas edades. La diferencia de edad entre una hoja y la hoja inmediatamente más vieja, o más joven, es de un plastocrono. Las hojas sucesivas divergen entre sí de una forma altamente regular, no sólo en edad sino también en su distancia del ápice, en longitud, en peso y en el grado de diferenciación histológica. Cuando se miden las longitudes de hojas sucesivas, por ejemplo, se observa que la relación de la longitud de una hoja con la longitud de la siguiente más joven es razonablemente constante para hojas que están creciendo deprisa. Esta relación, a la que podríamos llamar relación plastocrónica, puede interpretarse como aquélla según la cual una hoja típica aumenta de longitud por plastocrono. Su constancia implica que las hojas primordiales y las hojas jóvenes crecen exponencialmente en longitud, es decir, a modo de un interés compuesto.

En muchas especies vegetales así estudiadas se ha visto que la relación plastocrónica era también constante para hojas lo bastante largas (de cinco a 50 milímetros de largo) como para ser observadas a simple vista y que podían medirse sin daño para la planta. La relación plastocrónica forma la base para un índice de la edad de desarrollo de un brote: el índice plastocrónico. Puesto que se añaden periódicamente nuevas hojas al brote, puede obtenerse un índice aproximado de edad del brote en plastocronos, contando las hojas cuya longitud supera cierto punto de referencia, digamos 10 milímetros.

Para mayor exactitud, podemos especificar que una planta en la que la quinta hoja, por ejemplo, mide 10 milímetros de longitud, tiene una edad precisa de cinco plastocronos. Si la quinta hoja fuera algo más larga de diez milímetros, el brote sería algo mayor de cinco plastocronos, pero quizá no alcanzaría los seis. A partir de la longitud medida de la quinta hoja y de la siguiente más joven (la sexta), puede calcularse una fracción de plastocrono que, añadida a cinco, constituye la edad plastocrónica del brote.

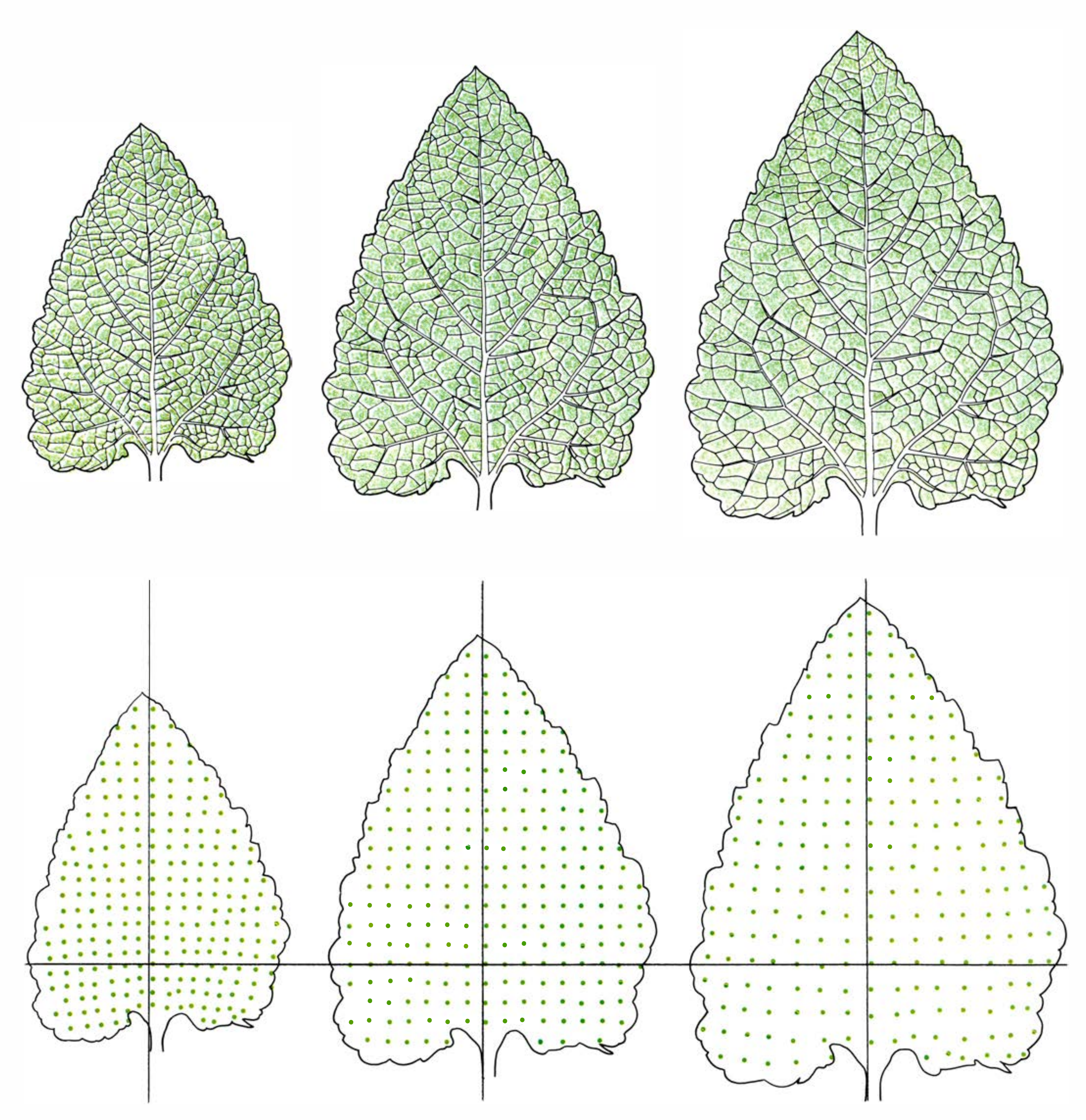
El índice plastocrónico, basado en tres medidas simples no destructivas, es una escala de desarrollo continua que puede emplearse para sacar indirectamente conclusiones acerca del crecimiento del meristemo apical de un brote, los primordios de las hojas y los segmentos del tallo cuando no son posibles las observaciones directas. El uso del índice ha empezado a utilizarse en diversos estudios descriptivos y experimentales del desarrollo de brotes.

Si se considera ahora este modelo de crecimiento vegetativo del brote en términos de los cambios espaciales y materiales que tienen lugar, resulta evidente que el modelo de crecimiento no es

constante, como sí lo era en el crecimiento radicular y en el mantenimiento del gancho de la plántula. Puede ser que en la sección desnuda del meristemo apical o en la región del tallo del joven brote los puntos estén desplazados según un modelo de velocidades que sea invariable con respecto al tiempo, pero los datos disponibles no son suficientes para decidir la cuestión. Ciertamente, en la eclosión de un primordio foliar y su crecimiento subsiguiente intervienen tanto cambios materiales como espaciales. La investigación futura tiene ante sí el reto del desarrollo de modelos adecuados para este complejo proceso y métodos eficientes para analizar datos sobre la morfogénesis del brote.

El crecimiento del brote presenta cierta regularidad sobresaliente. Se trata de que los acontecimientos ocurridos a lo largo de un plastocrono (la iniciación de un primordio, su desplazamiento por el crecimiento del ápice y su posterior crecimiento como hoja) repiten de forma muy similar los acontecimientos del plastocrono precedente. Este ritmo plastocrónico de los procesos de crecimiento que se repiten en el tiempo y se desplazan en el espacio es característico del crecimiento de un brote. Otros procesos de crecimiento del brote, como la transición del ápice hacia la producción de una flor, el crecimiento estacional y el fenómeno de crecimiento foliar irregular, quizás encuentren su interpretación más acertada como modificaciones de este modelo.

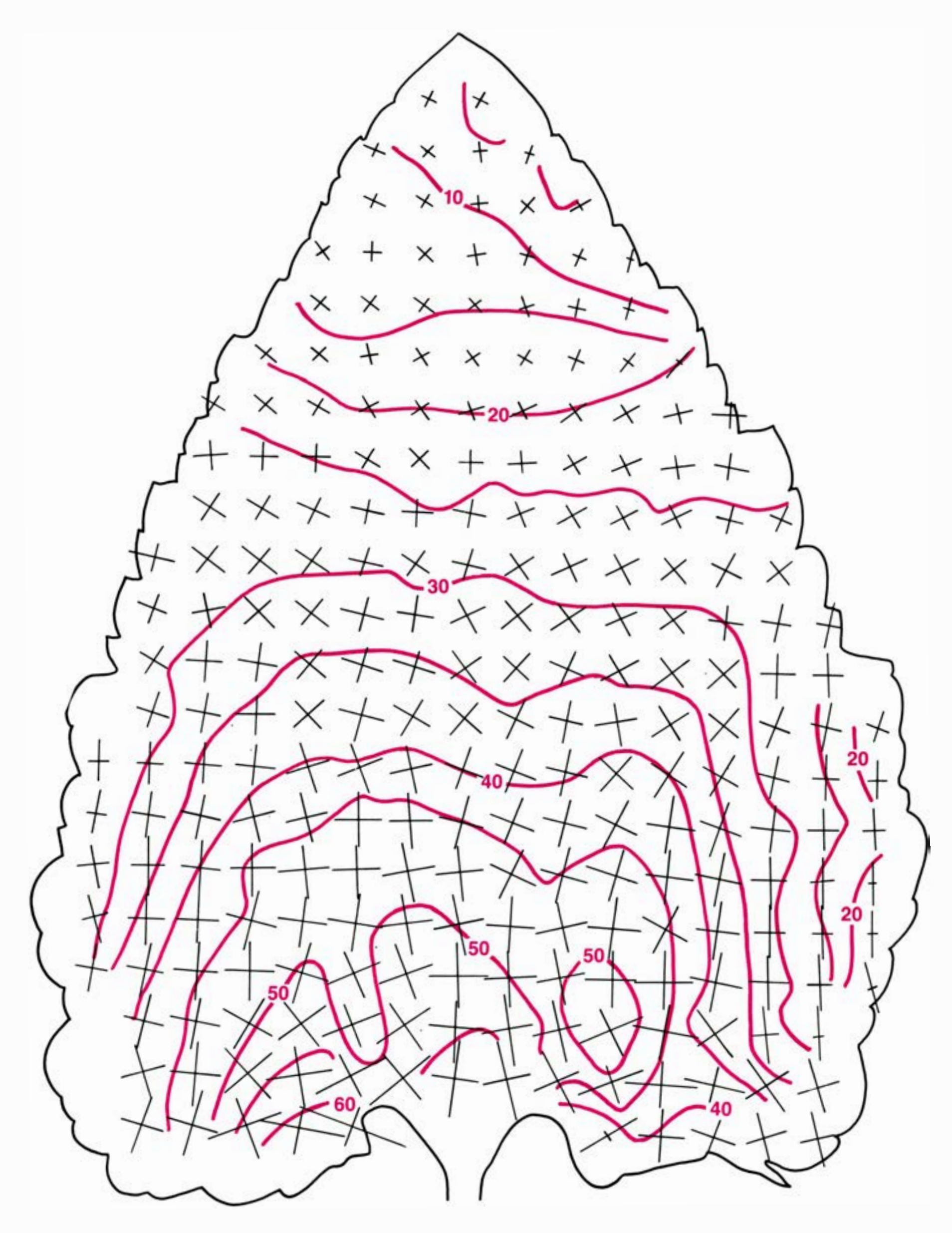
Hemos mostrado que un conocimiento de la variación espacial y temporal en las tasas de crecimiento



CRECIMIENTO FOLIAR representado en dibujos (*arriba*) basados en fotografías de una hoja de *Xanthium* tomadas en tres días sucesivos. En los dibujos de la parte inferior se representan un conjunto de puntos identificados por inspección de las fotografías. El cambio de relación de los puntos durante los tres días muestra que el crecimiento más rápido se sitúa cerca de la base de la hoja. La configuración de una hoja está predeterminada.

dentro de los tejidos es esencial para entender los aspectos morfológicos del desarrollo vegetal. La aplicación de este análisis del crecimiento puede constituir también un poderoso instrumento en los estudios fisiológicos. Por ejemplo, si se tuviera interés en la biosíntesis proteica, debería conocerse la distribución espacial tanto del ritmo de desplazamiento como del contenido en proteína a fin de calcular las tasas locales de biosíntesis en el tejido en crecimiento. Se encontraría entonces que aun cuando el contenido en el tejido local de un producto de biosíntesis fuera constante, la planta produciría la substancia a un ritmo necesario para mantener el contenido durante la expansión local, más o menos una cantidad necesaria para mantener el gradiente espacial existente durante el desplazamiento de las células.

La bibliografía existente sobre la fisiología del tejido en crecimiento no suele aportar datos de este tipo. De hecho, los estudios de la variación espacial de las tasas de crecimiento dentro de órganos vegetales en crecimiento se encuentran raramente en la literatura botánica. La aparición, a bajo costo, de gráficas interactivas mediante ordenador implica que el análisis de las tasas de crecimiento al menos ya no es difícil. La próxima década contemplará grandes avances en el análisis de la morfogénesis y en las determinaciones de tasas de cambio celular, tasas locales de biosíntesis y tasas locales de transporte en los vegetales en crecimiento.



MODELO DE CRECIMIENTO FOLIAR indicado por un dibujo basado en un cálculo por ordenador. La magnitud de crecimiento en superficie de una hoja de *Xanthium* se dibuja mediante curvas de igual tasa (expresado en porcentaje por día). Las direcciones de expansión lineal máxima y mínima están indicadas por líneas cruzadas en cada uno de los puntos identificados sobre la hoja. El cálculo muestra que el crecimiento es casi isótropo, es decir, casi igual en todas direcciones. También demuestra que la gran variación espacial registrada en la magnitud de la tasa de crecimiento y la pequeña cantidad de anisotropía bastan para explicar el cambio de configuración de la hoja al alcanzar su forma madura.

Los orígenes de la minería del cobre en Europa

La edad de los metales comenzó en el Mundo Antiguo con el uso del cobre "nativo". El incremento de la demanda requirió la explotación de los minerales de cobre, una de cuyas primeras minas se abrió en Rudna Glava, Yugoslavia

Borislav Jovanović

El primitivo dominio de la metalurgia por el hombre, que se evidencia con la variedad de artefactos de cobre encontrados en Europa y en Asia Occidental, marcó el final de un gran ciclo de la Prehistoria y el comienzo de otro. En términos tecnológicos, el ciclo que finalizó podría llamarse ciclo de los descubrimientos primarios y de las innovaciones básicas. Este ciclo comenzó con el control del fuego por el hombre y concluyó con la revolución neolítica: el dominio de la agricultura y de la ganadería.

Hasta hace poco, los estudios sobre el origen y el desarrollo de la metalurgia del cobre en el sudeste de Europa, región en la que yo trabajo, se habían enfocado hacia las primitivas herramientas, armas y ornamentos de cobre, y habían pasado por alto cómo se obtenía el metal. Estos estudios, sin embargo, son de vital importancia. Después de todo, el cobre fue el primer metal abundante para el hombre, y las herramientas hechas con el mismo impulsaron casi todas las transformaciones básicas de la existencia humana, como la adopción de la agricultura o incluso las más antiguas técnicas del fuego. Debe tenerse en cuenta una diferencia importante entre el más reciente de estos cruciales acontecimientos y los dos más antiguos: la explotación del fuego y la domesticación de animales y plantas se basaron en recursos naturales manifiestamente claros. En esencia, para inspirar el dominio de tales prácticas, todo lo que se necesitaba era el reconocimiento de cuán útil podría resultar su adopción para las actividades humanas. La elaboración del metal exigió un cambio más radical en el estado natural de los quehaceres: la profunda y permanente alteración de los materiales. Desarrollada la nueva tecnología, se posibilitó a las comunidades humanas el deseo de artefactos hechos con una sustancia que tenía propiedades totalmente nuevas.

Diré aquí lo que se ha aprendido con respecto a la primitiva minería del cobre, la más antigua de las conocidas en Europa, en un lugar descubierto accidentalmente en Yugoslavia: Rudna Glava, cerca de la frontera con Rumanía, a 140 kilómetros al este de Belgrado. Al mismo tiempo, intentaré relacionar la mina de Rudna Glava con la primitiva minería de cualquier otro lugar de los Balcanes, de otras partes de Europa y de Asia Occidental.

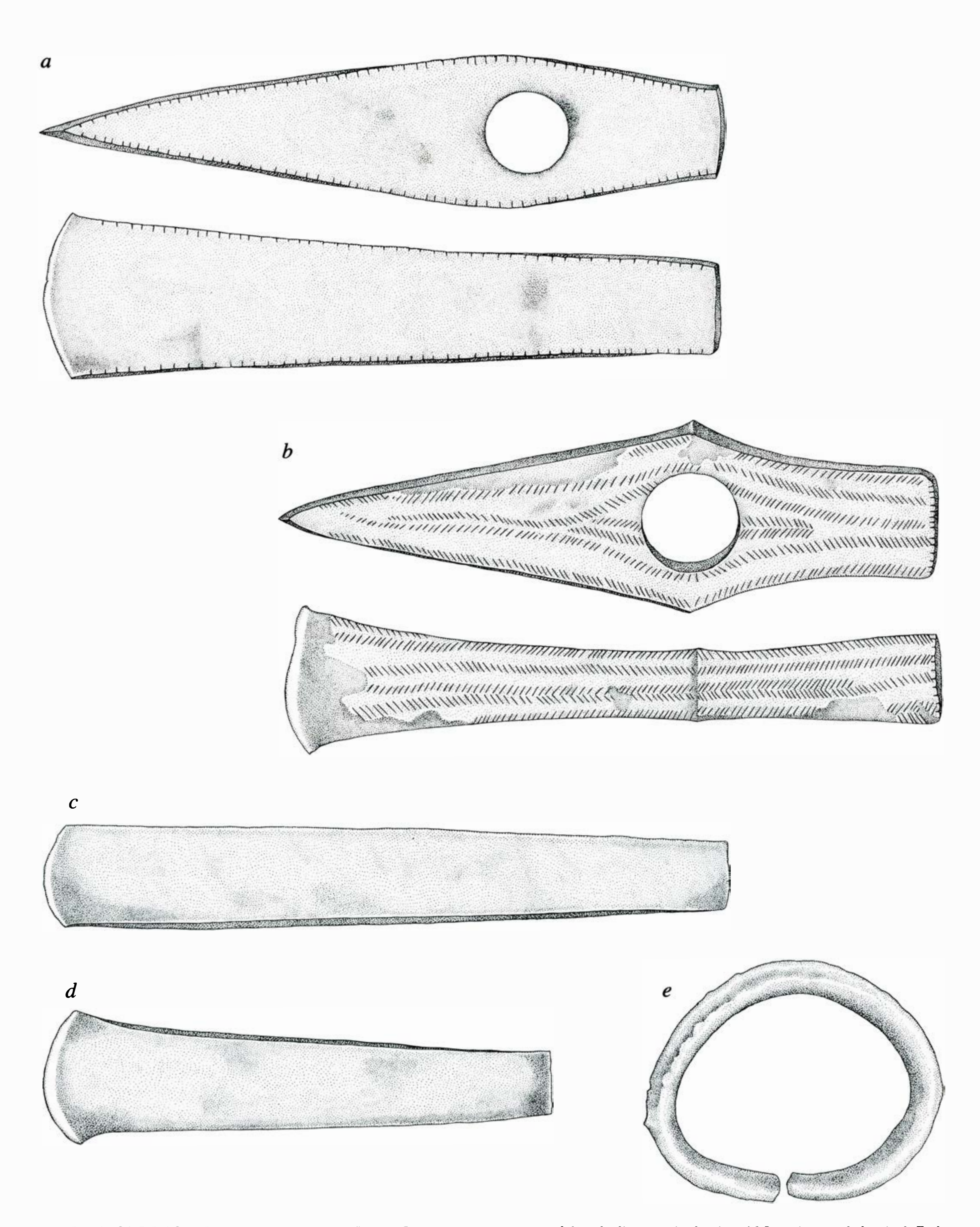
El primer cobre explotado por el hombre prehistórico fue, sin duda, el cobre "nativo", es decir, el metal más bien en forma pura que en forma de minerales diversos. En muchas regiones en las que hay ricos yacimientos de minerales de cobre, es bastante fácil encontrar pepitas de cobre nativo sobre la superficie del terreno. De cualquier modo, tales suministros del metal cuproso eran limitados, y de ahí que los primitivos metalurgistas debieran agotarlas pronto. Después de eso tuvieron que excavar para obtener el mineral y hubieron de fundir para sacar el metal.

En vista de que la minería del cobre desempeñó un papel crucial en la historia de la humanidad, uno piensa que las primitivas minas de cobre habrían constituido un importante componente en los estudios de los prehistoriadores interesados. Pero no ha sido así y ello por una razón importante: la mayor parte de las minas primitivas se destruyeron con posteriores explotaciones mineras. Poco más o menos tal fue la desaparición de Rudna Glava.

En Rudna Glava, los filones de mineral de cobre arman en un macizo de caliza. Se formaron por una lenta descomposición de la calcopirita, un sulfuro de cobre y de hierro asociado con el mineral de hierro magnetita, que se encuentra en la caliza. La magnetita se extraía en Rudna Glava por medio de explotaciones a cielo abierto, hasta años tan recientes como el de 1968. Estas labores destruyeron un número determinado de antiguos pozos de extracción de mineral de cobre, antes de que alguien pudiese reconocerlos como laboreos de hombres prehistóricos. Desde entonces, este lugar se ha investigado intensamente bajo los auspicios combinados del Museo de Minería y Metalurgia de Bor y del Instituto Arqueológico de Belgrado.

La minería se practicaba mucho antes de la Edad de los Metales. Es más, la minería en Europa era un arte bien desarrollado en los tiempos neolíticos, contrariamente a la opinión de aquellos que consideran que la mayoría de los avances tecnológicos, habidos en las regiones sitas al norte de los países ribereños del Mediterráneo, procedían de otras culturas más desarrolladas existentes en el sur. Aunque en una escala comparativamente menor, la minería se realizaba también en Europa durante la última época del Paleolítico, hace al menos unos 10.000 años.

Los mineros del Paleolítico y los que les siguieron estuvieron ocupados principalmente en la obtención del sílex para herramientas, aunque también extrajeron otros minerales deseables. Por ejemplo, en la localidad de Vinča, de los alrededores de Belgrado, el mineral rojo de mercurio –cinabrio– se escogía para utilizarlo como colorante. En otros lugares, el óxido de hierro ocre se extraía con fines análogos. En las islas griegas y en las montañas de Hungría se explotaban



ARTEFACTOS DE COBRE típicos de la cultura Vinča, que floreció en la región central de los Balcanes durante el quinto y el cuarto milenio antes de Cristo, procedentes de Pločnik, localidad ubicada en Servia a 165 kilómetros al sur-sudeste de Belgrado. En la parte superior (*a*) se encuentra un hacha con mango, vista de frente y de perfil; mide 17 centímetros de longitud. Inmediatamente debajo (*b*) se ve una segunda hacha, que está decorada con un elaborado diseño espigado; tiene 16,5 centímetros de longitud. En la parte inferior se aprecian dos cinceles; el más largo (*c*), de 17 centímetros de longitud, y, el más corto (*d*), de 12,6 centímetros. A su derecha está un brazalete (*e*), perteneciente a la variedad de ornamentos de cobre hecha por los artífices de Vinča. A finales del Neolítico y principios del Calcolítico, el uso de herramientas, armas y ornamentos de cobre fomentó su minería.

MOUNT GABRIEL
MITTERBERG
RUDNA GLAVA
PLOČNIK
AI BUNAR
CHINFLON

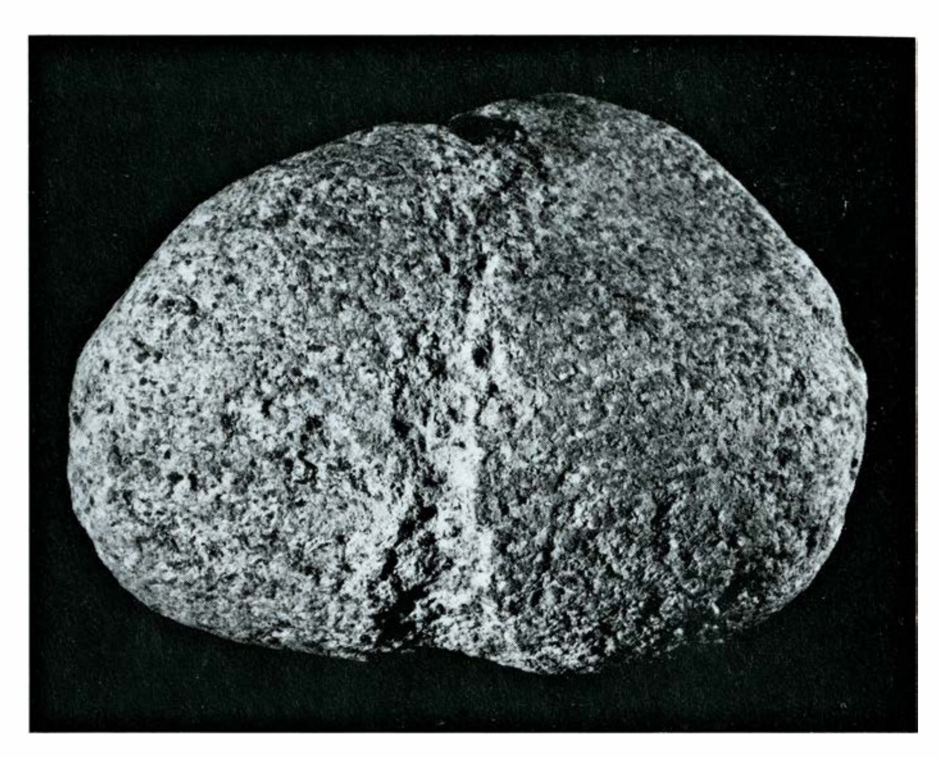
PRIMITIVAS MINAS DE COBRE conocidas desde Irlanda y España hasta Turquía e Irán, de oeste a este, que han sobrevivido gracias a la cancelación de posteriores explotaciones mineras. De las cinco minas (*triángulos*) señaladas en este mapa sólo estaban en explotación, sin embargo, dos en los Balcanes (Rudna Glava en Yugoslavia y Ai Bunar en Bulgaria) y una en España, durante el período Calcolítico, que es el intervalo de separación entre el período Neolítico y el comienzo de la Edad del Bronce. De estas tres, la de Rudna Glava es la más antigua, conforme se ha demostrado por los descubrimientos realizados en ella de la típica alfarería de la cultura Vinca (en honor de una localidad próxima a Belgrado).



MODERNA EXPLOTACION DE HIERRO a cielo abierto en Rudna Glava que muestra esta cara escarpada de la roca, vista desde arriba. La caliza del yacimiento es rica en el mineral de hierro denominado magnetita, con el que está asociado el sulfato de cobre y de hierro llamado calcopirita; la descomposición de la calcopirita dio nacimiento a los filones del mineral de cobre en la roca madre. Antiguamente, los mineros de los tiempos de la cultura Vinča extraían el mineral excavando en sentido descendente, a lo largo de los filones; los modernos mineros que explotan el hierro lo extraen mediante cortes horizontales en la roca, y ponen al descubierto los pozos verticales de los mineros del cobre. En el centro, el nivel inferior de un pozo.

depósitos de obsidiana vítrea volcánica. Una amplia variedad de rocas ígneas se recogían como materias primas para hachas y cinceles especiales destinados a trabajos duros. El mármol blanco y otros minerales semipreciosos se utilizaron en amuletos. Las conchas marinas fosilizadas, que se extraían del Mediterráneo, se transportaban hacia el sudeste y centro de Europa. Los primitivos mineros de todas partes explotaban los depósitos locales de arcilla para la manufactura de vasijas y de artefactos similares endurecidos al fuego. De modo que, con bastante antelación al desarrollo de la metalurgia del cobre, la Europa prehistórica poseía una avanzada tecnología minera totalmente propia.

Por tanto, del mismo modo que las cacerías y las reuniones, la minería es una actividad humana mucho más antigua que la agricultura. Incluso podríamos proponer una sentencia para la posteridad: la domesticación de los minerales precedió bastante a la de los animales y plantas.



MAZA DE MINERO encontrada, como otras muchas, en los pozos del yacimiento de Rudna Glava. Se trata de un canto de gabro (que es una roca ígnea granular) de unos 20 centímetros de longitud. La garganta lleva una correa con la que puede girarse alternativamente la maza rotando sobre sí misma.

Durante el Paleolítico, el sílex se extraía mediante la excavación de pozos poco profundos o de calicatas. En los tiempos del Neolítico se excavaban pozos verticales y galerías horizontales, para llegar a los yacimientos de sílex. La tecnología de la minería del cobre era prácticamente la misma en Rudna Glava. Normalmente, los estratos productivos del sílex son horizontales y los filones del mineral de cobre en Rudna Glava son verticales; sin embargo, los mineros extraían el mineral excavando plataformas horizontales de acceso con cierta pendiente hasta que el filón se tenía a muro, y luego perforando pequeños pozos verticales en el filón. La herramienta básica de excavación era una maza de piedra. En las minas de sílex, por razones de economía, las mazas se hacían normalmente de sílex, que era el material que se tenía más a mano. En Rudna Glava, las mazas eran grandes cantos de gabro (roca ígnea granular) con una garganta nervada o lisa, de modo que la piedra podía girarse en alternativas rotaciones, por medio de una traviesa o de un bucle de cuerda. Este último tipo de accionamiento era evidentemente el preferido, porque un cincel con una traviesa de madera sería difícil de manejar en el reducido espacio del pozo minero.

Los cinceles de piedra, que tenían por término medio unos 25 centímetros de longitud y unos 10 centímetros de anchura, pesaban entre dos y cuatro kilogramos. Todos los que se han encontrado, bien en plataformas de acceso o bien en pozos verticales, mostraban fuertes desgastes en sus superficies de trabajo. Muchos de ellos estaban rotos. Tambien se recogieron astas de venados; presumiblemente servían como palanquetas o alzaprimas, ya que las herramientas de asta se encontraban con abundancia, durante el Neolítico, en las minas de sílex de Europa.

Después de preparar una plataforma de acceso, los mineros de Rudna Glava seguían el filón del mineral hacia abajo, en algunos casos hasta una profundidad de 15 a 20 metros. En aquellos casos en los que el filón se extendía lateralmente, si valía la pena, los mineros excavaban también cortas galerías horizontales, aunque dedicaban sus principales esfuerzos a los pozos verticales de mineral rico. La mayor parte de los minerales que se extraían estaba constituida por malaquita y azurita, carbonatos de cobre respectivamente verdes y azules que pueden tener calidad de piedras preciosas.

La campaña arqueológica en Rudna Glava encontró más de 20 pozos excavados en los filones. No existe regularidad alguna en las dimensiones de los pozos; variaban con la importancia de los filones. Algunos filones se desarrollaban sin interrupción, y otros se subdividían hasta convertirse en simples rayas dentro de la roca madre caliza. En aquellos puntos en los que un pozo excavado revelase peligro de derrumbamiento, los mineros construían muros de sostenimiento con piedra seca, utilizando el escombro producido por su propio frente de arranque. La máxima profundidad de excavación parece que estaba determinada por la disponibilidad de aire fresco.

El suministro de aire fresco era importante no sólo para el propio bienestar de los mineros, sino también porque éstos utilizaban una técnica de calentamiento y enfriamiento alternativos, para trocear el mineral y facilitar la extracción. Bajaban recipientes de agua y hacían pequeños fuegos contra la cara del mineral, y era necesario tener un buen suministro de aire si los fuegos tenían que calentar bien. Cuando la roca estaba suficientemente caliente, los mineros la regaban con agua; la súbita contracción de la roca enfriada, la fracturaba. Era entonces cuando entraban en juego las herramientas de astas (y sin lugar a duda las cuñas de madera que desde hace tiempo se han pulverizado) para ensanchar las grietas y conseguir trozos sueltos de mineral. El mineral se izaba probablemente en sacos hasta la superficie, en donde había de clasificarse según los colores.

Al parecer, el mineral de cobre no se fundía en ningún lugar próximo a Rudna Glava. A pesar de la cuidadosa investigación del lugar y de sus alrededores, no se ha encontrado ninguna



DEPOSITO DE VASIJAS, uno de los tres que se encontraron en Rudna Glava. Los mineros fracturaban el mineral calentando primero los filones con un pequeño fuego y luego enfriándolos con agua, transportada hasta allí en las vasijas. Esta vasija es típico objeto de la cultura Vinca tardía.

NIVEL INFERIOR DE UN POZO, que contiene una maza de minero (*a la izquierda, en primer plano*), quizás abandonada cuando fue extraído el mineral. Las mazas abandonadas en los diferentes niveles de los pozos sugieren que la minería, en Rudna Glava, era una actividad de ciclo estacional.

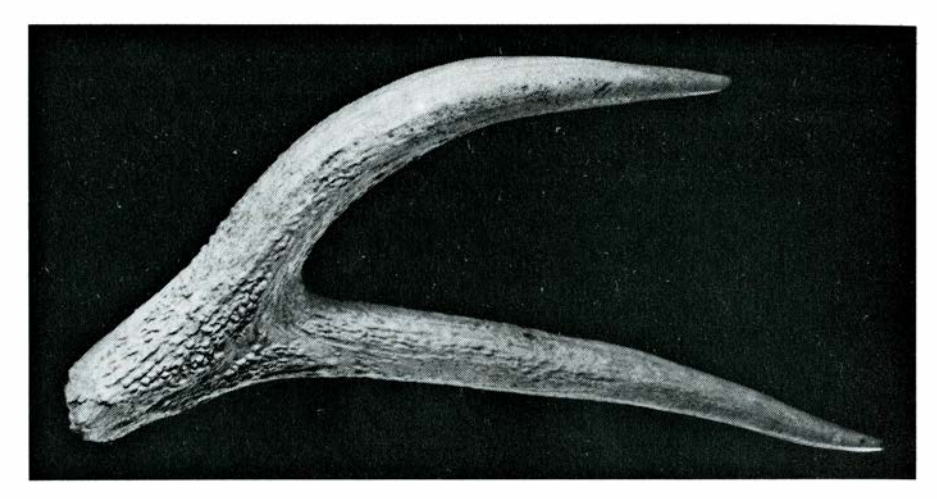
prueba de tal actividad. Parece que el mineral se transportaba hasta el centro de población más próximo, unos 80 kilómetros al oeste en el valle del río Morava. En la región de la minería del cobre de Ai Bunar, al sur de Bulgaria, la práctica parece haber sido la misma. Los minerales de este yacimiento, listos para su procesado, se han encontrado en una serie de regiones de asentamientos contemporáneos de los alrededores.

Siempre es arriesgado construir una hipótesis sobre pruebas negativas, pero la ausencia de toda evidencia de fundiciones de cobre en Rudna Glava sugiere el hecho de que la minería no era una actividad de ciclo anual, sino que se trataba de un trabajo estacional. Aún más, una indicación positiva apunta a la misma conclusión. Se han encontrado hachas descartadas en los diferentes niveles de los mismos pozos, muchas de las cuales yacían en grietas laterales. Esto indica que las hachas abandonadas cerca de la superficie marcaban el final de una campaña minera, y las que se encontraban más lejos de ellas, abajo en el pozo, marcaban el final de las campañas subsiguientes. El mismo tipo de esquema se presenta respecto de los muchos recipientes de alfarería que los mineros abandonaban en el subsuelo, después de utilizarlos para llevar el agua precisa por la técnica de calentamiento-enfriamiento, para el arranque del mineral. En Rudna Glava, los hallazgos arqueológicos más ricos provinieron de pozos mineros que estaban rellenos con restos de labores mineras posteriores; aunque no se demuestre, esto sugiere también la minería de tipo cíclico. Si la demanda de mineral era continua, lo que parece cierto, el esquema cíclico más probable habría de ser el estacional.

Hasta aquí no he identificado a los mineros de Rudna Glava en términos bien de cultura o bien de período histórico en el que estuvieron activos. En este aspecto, hemos tenido la suerte de que los mineros hayan dejado tras de sí algunas de sus piezas de alfarería. La cultura balcánica es bien conocida por estos recipientes a través de las excavaciones en numerosas localidades habitadas en la antigüedad por todo el sudeste de Europa, y su edad se ha determinado lo mismo en términos relativos que en términos absolutos.

La cultura se llama Vinča; es una cultura del Neolítico Superior, nominada por el lugar, antes citado, de las proximidades de Belgrado. Las determinaciones con carbono-14 situaron la primera fase de la cultura Vinča en la segunda mitad del quinto milenio antes de Cristo. En esta fase, el pueblo de Vinča pasó a ocupar los Balcanes Centrales y la parte sur de la llanura de Pannonia, al sur y oeste del Danubio. La alfarería encontrada en los pozos mineros de Rudna Glava pertenece a un período transitorio de la cultura Vinča, que separa el período Vinča temprano del Vinča tardío.

Tres diferentes acumulaciones de alfarerías recuperadas en los pozos mineros proporcionan la base de este descu-



HERRAMIENTA GASTADA HECHA DE ASTA, que fue otro de los artefactos de minero encontrados en los pozos de Rudna Glava. En el Neolítico, los mineros europeos de sílex también utilizaban astas, a modo de palanquetas y alzaprimas. La minería existió ya antes de la Edad de los Metales.



FIGURA DE ALFARERIA EN FORMA DE CIERVO, que se encontró en el depósito más antiguo de Rudna Glava. En esta fotografía aparece reconstruida y tiene 21 centímetros de altura. Su cuerpo rectangular forma una artesa baja. Ello sugiere que debió servir, por tanto, como lámpara de minero.

brimiento. La más antigua de las tres acumulaciones se encontró en el borde de un nivel de acceso, concretamente en el nivel asociado con los pozos números 2-*r* y 2-*g*. Allí, al mismo tiempo que una herramienta deteriorada hecha de asta y un mazo largo, los excavadores recuperaron una vasija rectangular hecha con la forma de un venado y tres vasijas de las denominadas ánforas por los arqueólogos clásicos. La efigie de venado es una pieza arqueológica del tipo conocido por "altar", porque podían quemarse ofrendas en su lomo con perfil de artesa. Parece probable que dichas efigies sirviesen como lámparas en la mina. De las ánforas, una era negra y tenía una superficie barnizada y ornamentada con un motivo de espirales. Las alfarería de este tipo es característica de la fase final de la cultura Vinča temprana, fase que es contemporánea con el final del período Neolítico en el sudeste de Europa, hace unos 6000 años.

La otras dos acumulaciones de alfarería se encontraron en el nivel de acceso al pozo número 7. La primera acumulación consistió en un cacharro de vajilla basta y en un ánfora. El ánfora era negra, barnizada y ornamentada con un ligero motivo espiral. La segunda acumulación consistió en dos ánforas con un cuello cónico, ambas de color gris y barnizadas. Las dos acumulaciones son características de la fase inicial de la cultura Vinča tardía, fase que generalmente es contemporánea con la que los arqueólogos europeos llaman Calcolítica o Eneolítica, que es un período de transición entre el Neolítico y la subsiguiente Edad del Bronce. La duración del Calcolítico (literalmente "cobre" y "piedra") varió en las diversas partes del Mundo Antiguo, y tarde o temprano se reemplazó en todos lados por la Edad de Bronce y el comienzo de la historia.

Así, todos los pozos de mineral de cobre en Rudna Glava, al menos los que se salvaron de las destrucciones accidentales y que están disponibles para nuestra observación, pueden datarse en la prehistoria dentro del período de las culturas anteriores a las de los metales, las culturas del Neolítico, que estuvieron expuestas a los primeros productos de la metalurgia: los objetos de cobre. ¿Cuál era la situación en otras partes del Mundo Antiguo? No lejos de Rudna Glava, en la localidad búlgara de Ai Bunar, los yacimientos de mineral de cobre se explotan en fechas anteriores mediante minería a cielo abierto. Los mineros realizaban su trabajo con prácticamente los mismos tipos de mazas de piedra que las encontradas en Rudna Glava, aunque sólo se recuperó una de dichas mazas. Las pruebas arqueológicas asocian las operaciones mineras en Ai Bunar con una cultura conocida como Karanovo VI, que se sitúa en el Calcolítico tardío. Sin embargo, esta cultura es considerablemente más moderna

	AÑOS HASTA AHORA	PERIODO CULTURAL		
PRINCIPIOS DEL CUARTO MILENIO a.C.	UNOS 5800	COMIENZA CULTURA VINČA TARDIA (COMIENZA EL CALCOLITICO BALCANICO)	DEPOSITO N.º 1	DEPOSITO N.º 2
FINALES DEL QUINTO MILENIO a.C.	UNOS 6100	TRANSICION DESDE LA CULTURA VINČA TEMPRANA HASTA LA TARDIA FINAL DEL NEOLITICO BALCANICO	DEPOSITO N.º 3	

LA DATACION DE LA ALFARERIA encontrada en las minas de Rudna Glava se hizo posible gracias a las muchas localizaciones residenciales de la cultura Vinča, conteniendo alfarerías de los mismos tipos, y se determinó exactamente con carbono-14. De esta forma, las piezas de los depósitos números 1 y 2 de Rudna Glava resultaron típicas de las primeras fases de la cultura Vinča tardía, que floreció en la primera mitad del IV milenio a. C., durante el período Calcolítico en los Balcanes. Las piezas del depósito número 3 son típicas de la transición entre la cultura temprana y la tardía.

que la de Rudna Glava temprana, cuya datación se fecha a finales del Neolítico.

Se conocen minas primitivas de cobre en otras partes de Europa. Una de ellas se ha descubierto bastante recientemente en la localidad de Chinflon, en España. Fue explotada principalmente durante la Edad de Bronce, pero también muestra pruebas de laboreo durante el Calcolítico. Todas las demás minas son más modernas. En Monte Gabriel, al oeste de County Cork, en Irlanda, los mineros trabajaron con mazas de piedra como las de Rudna Glava, aunque lo hicieron durante la Edad del Bronce. En Mitterberg, Austria, existió minería desde finales de la Edad del Bronce. Fuera de Europa, un emplazamiento minero de cobre en la región Veshnoveh del Irán, con galerías subterráneas de 40 metros de longitud, fue explotado con el mismo tipo de mazas de piedra que las encontradas en Rudna Glava. Los mineros de Veshnoveh tampoco comenzaron sus trabajos hasta principios de la Edad del Bronce. La localidad de Kozlu, en Turquía Central, tuvo otra de las minas primitivas de cobre del Asia Occidental. Se dice que sus pozos alcanzaron más de 50 metros de profundidad. Una vez más, la minería comenzó en los albores de la Edad del Bronce (h. 2800 a. C.).

¿Es quizás en Rudna Glava donde se encuentra la mina de cobre más antigua del mundo? Resulta bastante improbable. Los objetos arqueológicos del Asia Occidental son mucho más antiguos que los de los Balcanes, y no todos ellos se han manufacturado con cobre nativo. Sin embargo, lo que sí puede afirmarse es que el pueblo de Vinča, y quizás incluso los primitivos habitantes de los Balcanes, desarrollaron con su propio esfuerzo la tecnología de la producción de cobre. Esta habilidad de extraer un nuevo tipo de materia prima, con los métodos desarrollados milenios antes para obtener sílex, no era un tecnología meramente copiada por los bárbaros de los Balcanes, como algunos han supuesto, tomando como ejemplo a los pobladores de las riberas del Mediterráneo técnicamente más avanzados.

¿Cómo desarrolló su talento el pueblo de Vinča para encontrar mineral de cobre? En Rudna Glava, esto sería posible incluso para un inexperto. Allí, el macizo de caliza al descubierto muestra unos retazos de color brillante, en los sitios por donde afloran los filones del mineral. Fue exactamente en estos lugares donde los mineros comenzaron sus excavaciones. No obstante, los sitios no se elegían indiscriminadamente. Los mineros dejaron sin tocar algunos filones, y modernos análisis han demostrado que las minas rechazadas eran pobres en algunos minerales concretos (azurita, malaquita y cuprita) que eran apreciados por los mineros de la cultura de Vinča.

Uno debe también preguntarse cuál fue la necesidad que desencadenó el estímulo para emprender este tipo de trabajo penoso y arriesgado. Hace algunos años la pregunta habría sido muy difícil de contestar. Sin embargo, hoy día los hallazgos arqueológicos en todos los Balcanes Centrales apuntan hacia la cultura Vinca e indican que este pueblo fue notablemente activo en la manufactura de herramientas, armas y ornamentos de cobre. Un ejemplo lo constituye el conjunto de los cuatro lotes de hachas y cinceles de cobre, de la cultura Vinča, recientemente desenterrados en Plocnik, al sur de Servia. Resulta algo dudoso que las minas de Rudna Glava comenzasen su laboreo en respuesta a una gran demanda de cobre entre el pueblo Vinča. Nunca podrá conocerse cuántas otras minas de cobre estaban en explotación en los Balcanes, en el mismo período. Probablemente han quedado destruidas por posteriores labores mineras, tal como ha ocurrido en los demás casos de Europa y Asia Occidental. Cualquier análisis de la introducción del cobre en los pueblos de la Europa prehistórica debe contemplar dos fenómenos separados: de una parte, el más antiguo conocimiento del cobre, y, de otra, la habilidad más antigua para obtenerlo y utilizarlo. La existencia de la metalurgia del cobre, en Asia Occidental y desde una fecha muy remota, sugiere que el conocimiento del metal se hubiese extendido por Europa, quizás, al mismo tiempo que los colonos de la cuenca del Mediterráneo se iban desplazando hacia el norte. De donde se deduce que el cobre ha debido conocerse, en Europa, mucho antes de que el metal fuese extraído, fundido y convertido realmente en herramientas, armas y ornamentos.

Dentro de esta secuencia de acontecimientos, la minería más antigua del cobre en Europa sería la prueba concluyente de la existencia, al mismo tiempo y en Europa, de la fundición y de la utilización del cobre, es decir, de la metalurgia del cobre. La mina de Rudna Glava aporta justamente esa prueba, datándose hace unos 6000 años, a finales del quinto milenio antes de Cristo. Por tanto, debe concluirse que la avanzada metalurgia del cobre, apoyada en su propia industria minera, evolucionó en los Balcanes por aquellas fechas.

El asunto de los rayos N

A principios de este siglo, un eminente físico francés descubrió una nueva clase de radiación, que otros confirmaron. La radiación resultó ser completamente imaginaria, lo que nos viene a demostrar que el creer puede hacer ver

Irving M. Klotz

La ciencia, como cualquier otra expresión del comportamiento humano, ha tenido sus grandes ilusiones: conceptos de aceptación general que entusiasmaron a una porción notable de la comunidad científica y que resultaron ser totalmente infundados. Como la historia tiende a recoger los éxitos de la ciencia, más que sus fallos, hasta el más sorprendente de estos conceptos puede llegar a olvidarse. Una excepción a la regla la constituye una forma completamente imaginaria de la radiación electromagnética conocida como rayos N. Por breve tiempo, las propiedades extraordinarias atribuidas a esta radiación se enseñorearon de la imaginación de los científicos de todo el mundo. Hoy día, el asunto de los rayos N se trae sólo a colación en razón de su valor paradigmático en psicosociología de la ciencia.

Para comprender el sentido de los rayos N debe considerarse el clima en el que se "descubrieron". Los albores del siglo XX constituyeron uno de los períodos más emocionantes de la ciencia moderna. En 1895, W. K. Röntgen había generado los rayos X. Se habían identificado emisiones radiactivas: rayos alfa, rayos beta y rayos gamma. Parecía inevitable que, al doblar el siglo, se encontrarían otros tipos de rayos. Y así, en 1903 René Blondlot, un distinguido físico francés de la Universidad de Nancy, anunciaba el descubrimiento de un nuevo tipo de radiación al que llamó rayos N.

De Blondlot, miembro de la Academia de Ciencias Francesa, no podía decirse que fuera un excéntrico. Su descubrimiento de los rayos N fue un error, no un engaño. Si los rayos se hubieran descubierto realmente en la década de 1880, diez años antes que los rayos X y la radiactividad, no hubieran tenido precedente, y es casi seguro que Blondlot hubiera sometido su hallazgo a un análisis mucho más riguroso. Sin embargo, en el primer decenio de nuestro siglo, los buenos físicos estaban psicológicamente preparados para dar con un nuevo tipo de rayo, de la misma manera que otros científicos estaban psicológicamente preparados para oír hablar del mismo. Ello explica que los hallazgos de Blondlot desencadenaran una reacción histérica en sectores de la comunidad científica, una ola de autoengaño que tardó años en desaparecer. El relato, que se inicia con Blondlot, tiene una trama compleja.

Blondlot era un hábil físico experimental en el ámbito de la radiación electromagnética. Había estudiado las descargas eléctricas en gases, el mismo tipo de fenómeno que había conducido a Röntgen al descubrimiento de los rayos X. Por tanto, no es de extrañar que, a partir de 1895, Blondlot se sintiera profundamente involucrado en la investigación de los rayos X. En particular, se planteó una cuestión que preocupaba a muchos físicos de esos años finiseculares: ¿eran los rayos X partículas o eran ondas electromagnéticas?

Sabemos hoy que cualquier forma de materia o energía puede presentar las características de onda y de partícula, pero en los tiempos de Blondlot la física tenía criterios fijos para determinar la naturaleza de los rayos de una fuente determinada. Por un lado, se sabía que las partículas provenientes de una fuente electrificada solían llevar una carga eléctrica, de manera que, si se las hacía pasar en línea recta entre dos placas metálicas, una cargada negativamente y otra positivamente, se desviarían de su trayectoria original. Por otro lado, era conocido que, aunque las ondas electromagnéticas no podían desviarse mediante placas cargadas, sí podían ser polarizadas: podían hacerse oscilar en un único plano bidimensional. Blondlot pensó aplicar esta última propiedad de las ondas electromagnéticas para determinar la verdadera naturaleza de los rayos X.

Si los rayos X fuesen ondas, razonaba Blondlot, podrían ser polarizados al salir del tubo de descarga eléctrica en el que se generaban. A fin de detectar una tal polarización, propuso colocar, en varias orientaciones a lo largo de la trayectoria de los rayos X, un detector formado por un par de alambres muy puntiagudos con una corta chispa eléctrica que saltaba en línea recta entre ellos. Si la línea a lo largo de la cual saltaba la chispa podía orientarse de manera que estuviese contenida en el plano de los rayos X polarizados, la componente eléctrica de la onda electromagnética reforzaría la energía de la chispa y aumentaría su brillo. Cuando Blondlot realizó el experimento, encontró, para satisfacción suya, que si el detector de chispas se colocaba formando un cierto ángulo con el tubo de descarga eléctrica, el brillo de la chispa aumentaba realmente y de manera visible.

Sin embargo, el entusiasmo de Blondlot se enfrió al siguiente descubrimiento. Nuevas pruebas con el detector revelaron que la radiación que actuaba sobre la chispa se desviaba cuando pasaba a través de un prisma de cuarzo. Experimentos anteriores habían demostrado inequívocamente que los rayos X no se curvaban al atravesar semejante prisma. Fue en ese punto donde Blondlot realizó lo que resultó ser un desastroso salto conceptual. Pensó que el visible aumento del brillo de la chispa indicaba que alguna onda incidía en el detector de chispas, y si la onda no era de rayos X, debía ser alguna nueva forma de radiación electromagnética. Llamó a la nueva radiación rayos n, y después rayos N, en honor de la Universidad de Nancy.

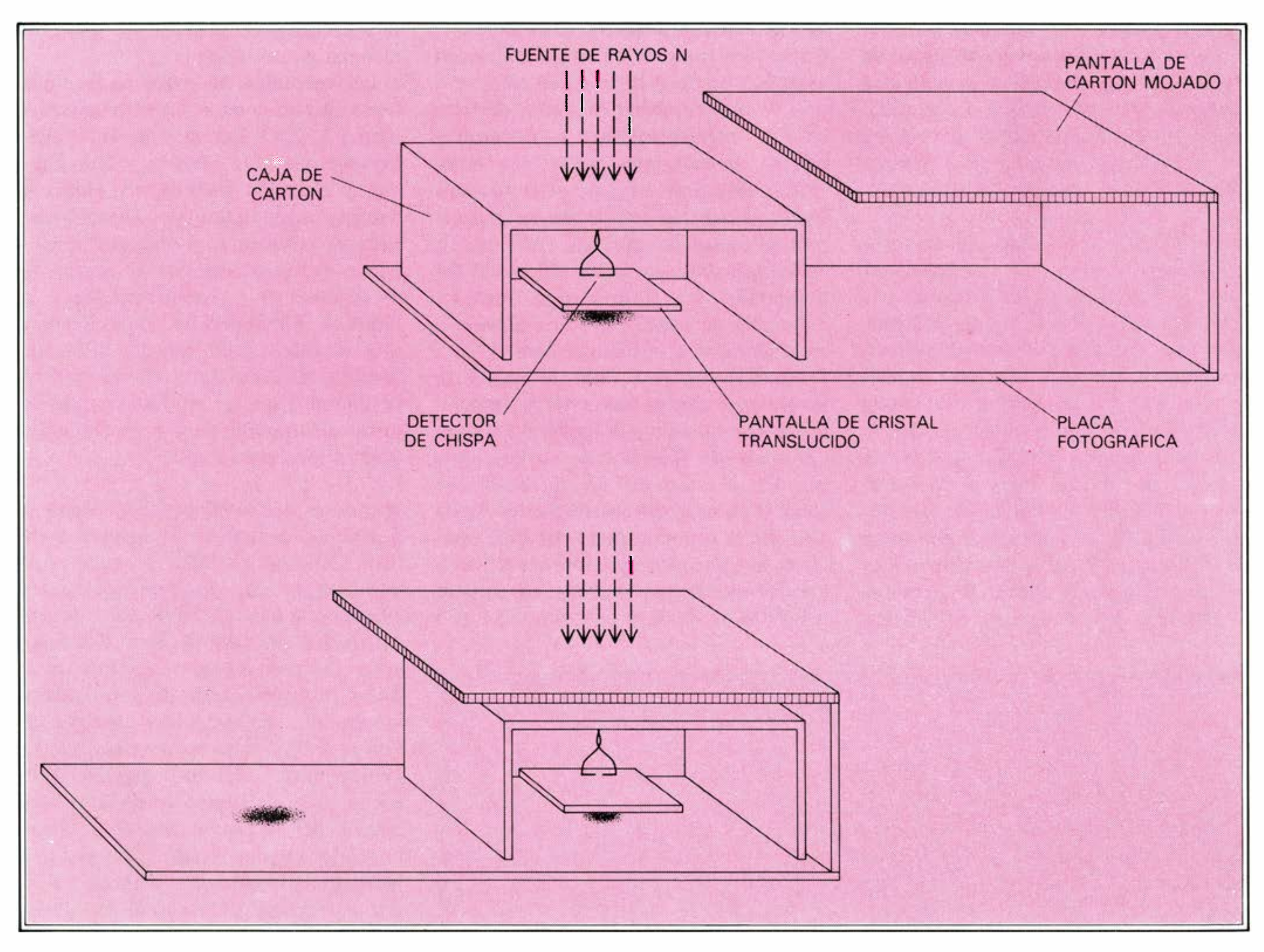
Como todo físico avezado, Blondlot sabía que también tenía que descartar la posibilidad de que los restos de las ondas de luz ordinaria del tubo de descarga eléctrica fueran los responsables del aumento del brillo de la chispa que señalaba la presencia de los rayos N.

Por tanto, diseñó un aparato fotográfico que recogía las intensidades de las chispas en el cual el detector de chispas estaba cubierto por una caja de cartón. Los rayos de luz visible no podían penetrar en la caja de cartón, pero sí podían hacerlo los rayos N. Comparando las fotografías tomadas cuando la fuente de rayos N se dirigía directamente a la caja con las tomadas cuando una pantalla especial que bloqueaba los rayos N se colocaba entre la fuente y la caja, se deducía claramente que el efecto de los rayos N sobre la chispa no disminuía con la exclusión de la luz. Alentado por este éxito, Blondlot se dedicó a desarrollar instrumentos más sensibles para detectar los rayos N, de los cuales el que tuvo más fortuna se fundaba en sustancias fosforescentes: sustancias que emiten luz cuando incide sobre ellas radiación de más energía.

El perfeccionamiento de estos métodos de detección mejorados le permitieron a Blondlot realizar un estudio más amplio de las propiedades y fuentes de los rayos N; y así, a comienzos de 1903, comenzó a publicar sus hallazgos en los *Comptes rendus*, los anales de la Academia de Ciencias. Pronto se sumaron a Blondlot los esfuerzos de científicos de distintas disciplinas. Físicos, fisiólogos y psicólogos se lanzaron a la empresa de investigar y explotar la nueva forma de radiación.

Esa plural labor de investigación llegó pronto al descubrimiento de propiedades de los rayos N que eran bastante interesantes. Casi todos los materiales que se mostraban transparentes al paso de los rayos eran opacos a la luz visible. La madera, el papel y láminas delgadas de hierro, estaño, plata y oro resultaron eficientes transmisores de los rayos N. Blondlot construyó incluso prismas y lentes de aluminio para focalizar y curvar los rayos. La mica, el cuarzo y la parafina también se manifestaron transparentes a los rayos; el agua y la sal común, que los bloqueaban, podían usarse para apantallarlos.

No se tardó mucho en observar que había varias fuentes de rayos N, además del tubo de descarga eléctrica. El manguito incandescente de Welsbach, un tipo de quemador de gas ampliamente usado para iluminación doméstica hacia 1900, resultó ser un rico manantial de rayos N. También lo era la lámpara de Nernst, lámpara en la cual una varilla delgada de óxidos de tierras raras se calentaba hasta la incandescencia mediante una corriente eléctrica. Trozos de plata y láminas de hierro calentados emitían rayos, pero, sorprendentemente,



PRUEBA FOTOGRAFICA TANGIBLE de la existencia de los rayos N. Se obtuvo mediante el experimento esquemáticamente recreado en este diagrama en sección. El presunto detector de los rayos era el espacio de la chispa; se decía que la chispa se hacía más brillante cuando los rayos N incidían sobre ella. El detector estaba encerrado en una caja de cartón. En el fondo de la caja se colocaba la placa fotográfica. Entre el detector de chispa y la placa fotográfica había una pantalla de cristal translúcido que difundía la luz de la chispa de manera que formara una mancha difuminada sobre la placa. Se creía que el cartón era transparente a los rayos N, de manera que cuando los rayos (*flechas*) caían sobre él (*arriba*), lo atravesaban, hacían la chispa más brillante y provocaban que la mancha sobre la placa fotográfica fuese más oscura. Pensaban que el agua era opaca a los rayos N, de manera que, cuando se introducía una pantalla de cartón mojado en un lugar sobre la caja (*abajo*), el agua de la pantalla bloquearía los rayos, determinando que la chispa fuera más tenue y la mancha de la placa fotográfica más clara. Sin embargo muchos otros factores afectaban el grado de claridad de la mancha. El empeño de los científicos en confirmar la validez del experimento les condujo a malinterpretar sus resultados.

el mechero de Bunsen no lo hacía. Sin embargo, resultó ser más interesante el descubrimiento de fuentes de rayos N naturales.

El propio Blondlot halló que el sol emitía rayos N. Adelantado ya el año 1903, otro miembro de la facultad de Nancy, un respetado profesor de física médica llamado Augustin Charpentier, sometió a la Academia de Ciencias un trabajo sobre la emisión de rayos N por el cuerpo humano. En la comunicación que fue presentada por el distinguido físico francés y miembro de la Academia Arsène d'Arsonval, Charpentier describía el descubrimiento de emisiones de rayos N, particularmente fuertes, por nervios y músculos. Más tarde anunció que podía detectar emisiones de rayos N por los cuerpos que acababan de morir, y un tal Monsieur Lambert informó que incluso los enzimas aislados de los tejidos del cuerpo emitían los rayos. (Charpentier dio a esos descubrimientos un uso práctico. A principios de 1904 anunció que el aumento de emisiones de rayos N que acompañaba la actividad motora podía servir como base para mejores métodos de exploración del cuerpo con finalidades clínicas, por ejemplo para detectar el contorno del corazón.)

Como sucede a menudo con los principales adelantos de la ciencia, los pioneros de la investigación de rayos N —Blondlot, Charpentier y sus colegas— fueron contestados por otros investigadores que aseguraban que ellos habían sido los primeros en descubrir e investigar la nueva forma de radiación. En la primavera de 1903, Gustave le Bon, un diletante en muchas áreas de la física, envió una carta a Blondlot (que éste publicó a renglón seguido) asegurando que siete años antes él había descubierto una forma de radiación que podía penetrar los metales. En diciembre del mismo año, un tal P. Audollet presentó una instancia en la Academia de Ciencias, en la que aseguraba que era él, y no Charpentier, quien primero había descubierto la emisión de rayos N por organismos vivos. Un mes más tarde, un espiritualista llamado Carl Huter acudía con una reclamación similar, pero en la primavera de 1904 la Academia declaró en una comunicación solemne por parte de d'Arsonval que los hallazgos de Charpentier habían precedido a todos los demás.

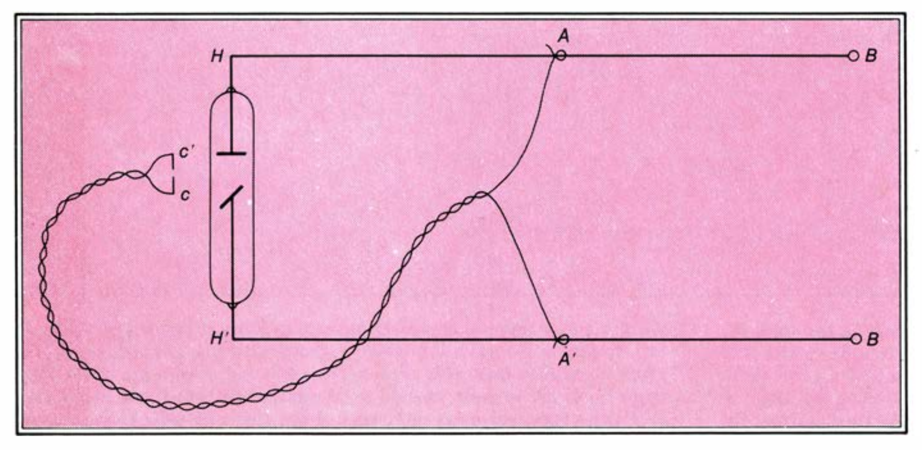
En 1904 la Academia otorgó a Blondlot el prestigioso premio Leconte, que comportaba una gratificación en metálico de 50.000 francos. Según el acta de concesión del premio, se le confería a Blondlot por (traduciendo del francés) "el conjunto de sus trabajos"; su "nuevo rayo" se menciona sólo al final de la lista de tres páginas de sus logros. El acta concluye, sin embargo, dando apoyo a Blondlot y ofreciéndole ayuda en sus investigaciones sobre los rayos N. Circularon rumores entre la comunidad científica francesa de la época en el sentido de que el primer borrador del acta trataba exclusivamente del descubrimiento de los rayos N, si bien finalmente acabó por imponerse la prudencia. (A Albert Einstein le fue otorgado el premio Nobel de física en 1922 por su "descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico". La relatividad se mencionaba sólo de pasada con una alusión a sus "servicios a la física teórica".)

Aupada con esta clase de apoyo, la investigación sobre los rayos N floreció. En el año y medio que siguió al anuncio por parte de Blondlot de su descubrimiento, el número de publicaciones sobre el tema creció casi de forma explosiva. En la primera mitad del 1903 aparecieron cuatro trabajos sobre el tema en los *Comptes rendus;* en la primera mitad del 1904, el número se elevó a 54. (Es interesante resaltar que en el mencionado período los *Comptes rendus* sólo ofrecieron tres trabajos sobre rayos X.) A partir de ese momento, la explosión frenó en seco; en 1905 los *Comptes rendus* no publicaron ningún trabajo sobre el tema. Había caído un mazazo sobre los rayos N. Y en ello tuvo que ver la visita que el físico norteamericano R. W. Wood hiciera a la Universidad de Nancy.

Wood, profesor de física en la Johns Hopkins University, era un experto de reputación internacional en óptica y en espectroscopía, la rama de la física que trata del análisis de la radiación electromagnética. Estaba vivamente interesado por la noticia de que Blondlot había identificado un nuevo tipo de radiación; como es costumbre cuando se descubre un nuevo fenómeno, había intentado rápidamente reproducir los sorprendentes resultados del físico francés. Como dijo a su biógrafo William Seabrook, fracasó completamente "después de toda una mañana de ensayarlo".

La experiencia de Wood no fue única. Otros físicos, entre los que debemos recordar a Lord Kelvin y a Sir William Crookes, en Gran Bretaña, y Otto Lummer y Heinrich Rubens, en Alemania, habían fracasado también. Otros investigadores instaron a Wood que fuera a Nancy y observara por sí mismo los procedimientos experimentales de Blondlot. Wood decidió visitar el laboratorio de éste, donde, como él decía, "las condiciones necesarias, manifiestamente peculiares, para la manifestación de esta excepcionalmente elusiva forma de radiación [parecían] existir."

Las dotes de Wood para su misión no se circunscribían al campo científico. Lleno de vitalidad y agudeza, era un hombre con muchas inquietudes aparte de la física. Cuenta, entre sus numerosas publicaciones, una dedicada a *cómo explicar las aves a partir de las flores,* pequeña parodia de un manual de la naturaleza en la cual los humorísticos versos de Wood se acompañan con sus propios dibujos de aves y plantas. Wood era un actor de cuerpo entero y, no obstante haber dejado ya muy atrás la adolescencia, seguía siendo un travieso y bromista empedernido. A modo de botón de muestra: utilizó en cierta ocasión su indudable talento como óptico para fabricar lo que debe haber sido una de las primeras fotografías de un objeto volante no identificado. También era un perseguidor infatigable de fraudes como los que envuelven la actividad de los médiums espiritistas. Un médium aseguraba que estaba en contacto con el di-



UNA FUENTE DE RAYOS N era un tubo de descarga de gas (*H-H'*). En este diagrama, basado en otro publicado en 1903, el detector de chispas (*c-c'*) está dentro del circuito del tubo de descarga. La mayoría de las observaciones de los efectos de los rayos sobre la chispa se hicieron visualmente.

funto físico teórico británico Lord Rayleigh. Wood planteó algunas abstrusas cuestiones sobre electromagnetismo para que el médium preguntara al espíritu; lógicamente, no hubo respuesta.

Hasta qué punto estas predilecciones influyeron en la confrontación de Wood con Blondlot puede juzgarse a partir del informe que escribió el propio Wood a propósito de su visita al laboratorio de Blondlot, publicado en el número correspondiente al 29 de septiembre de 1904 de la revista *Nature*. (Aunque Wood no señalaba a Blondlot en el artículo, Seabrook, en la biografía que hizo del físico estadounidense, cuenta que todos los sucesos que Wood describe en el artículo ocurrieron en Nancy.) Según Wood, Blondlot y sus colegas le recibieron cordialmente y le dedicaron una serie de experimentos a fin de mostrarle las distintas propiedades de los rayos N.

El primer experimento que Wood presenció fue una versión mejorada del que originalmente reveló la existencia de los rayos N a Blondlot. Se dirigieron los rayos N, emitidos por una lámpara de Nernst, a través de una lente de aluminio que servía para concentrarlos sobre la chispa de un detector de chispas. Blondlot y sus colegas decían que, si un observador ponía su mano en la trayectoria de los rayos en un punto cualquiera entre la fuente y la chispa, el bloqueo de los rayos se manifestaría como una disminución en el brillo de la chispa. Un pequeño disco de cristal translúcido, colocado en el lado del detector opuesto a la fuente, servía para difundir la luz de la chispa de manera que pudieran observarse más fácilmente los cambios de brillo.

Wood describe el resultado del experimento como sigue. "Se aseguraba que [la fluctuación en el brillo de la chispa] era observable con la máxima claridad, aunque yo fui incapaz de detectar el más mínimo cambio. Esto se explicó como debido a una falta de sensibilidad de mis ojos, y como prueba yo sugerí que se probara anunciando los momentos exactos en los que yo introducía mi mano en la trayectoria de los rayos, observando la pantalla. En ningún caso se dio una respuesta correcta, indicándose que la pantalla era brillante u oscura, alternativamente, cuando mi mano estaba parada en la trayectoria de los rayos, mientras que las fluctuaciones observadas cuando yo movía la mano no tenían ninguna relación con sus movimientos."

Los juicios visuales de intensidades luminosas son notoriamente poco fiables, pero la siguiente demostración que



RENÉ BLONDLOT (1849-1930) era el físico que creyó haber descubierto los rayos N. Respetado profesor de la Universidad de Nancy, Blondlot fue muy celebrado por su trabajo sobre este y otros temas. Aparece en este retrato de archivo vestido con la toga de la Academia de Ciencias Francesa.

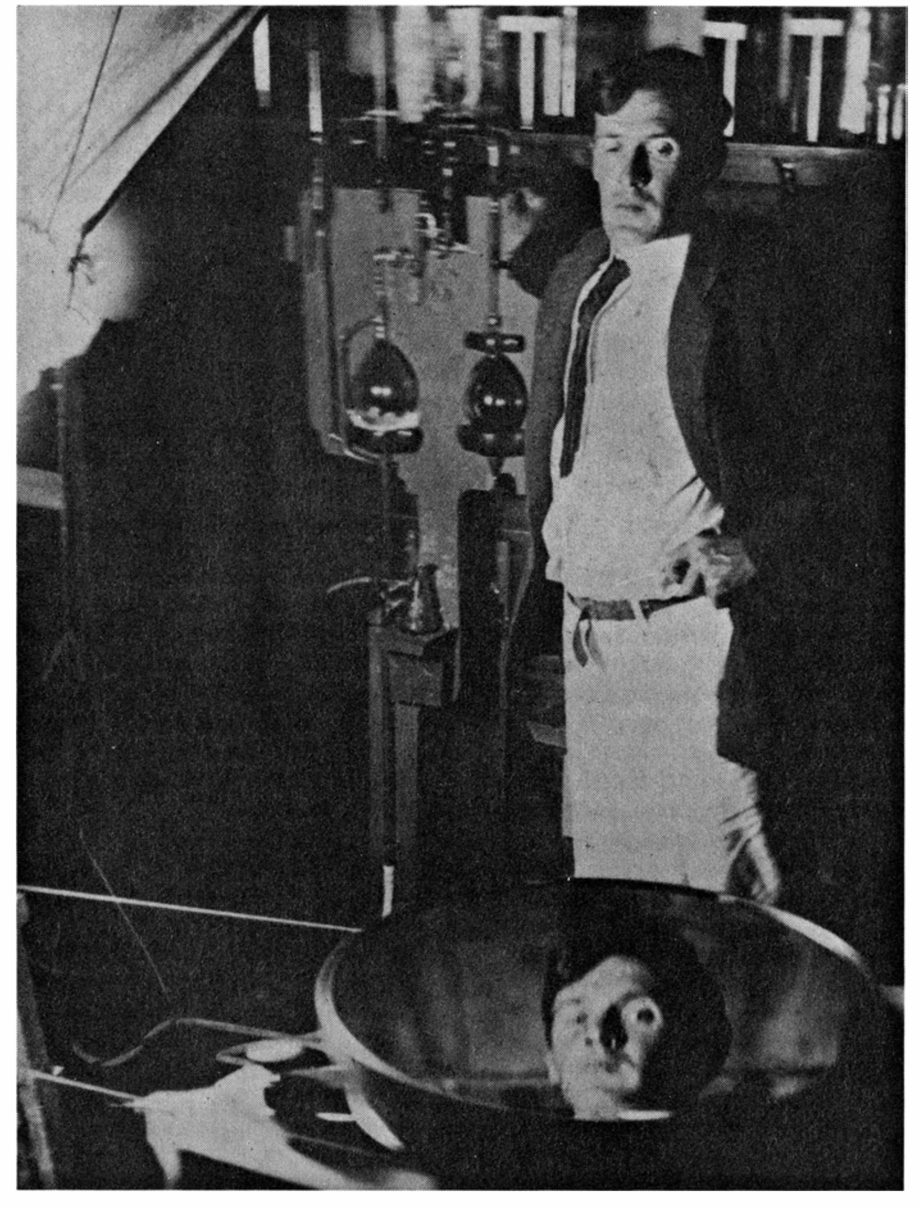
Wood observó fue una de las que Blondlot había diseñado como prueba fotográfica de la existencia de los rayos N. El aparato para este experimento incluía una placa fotográfica horizontal con una pantalla de cristal translúcido encima. Sobre el cristal translúcido había un detector de chispas, y, por encima de éste, una pantalla de cartón (de hecho la parte superior de una caja a prueba de luz que cubría el aparato y la placa fotográfica). En la cúspide de todo el dispositivo, la fuente de rayos N.

La placa fotográfica se extendía a un lado de la caja de cartón y podía deslizarse de un lado a otro bajo ella. Acoplada a la placa había una pantalla de cartón mojado que podía deslizarse por encima de la caja. Así, cuando la placa fotográfica estaba en una posición podía recoger el brillo de la chispa sin que el cartón humedecido se interpusiera entre la chispa y la fuente de rayos N, y cuando estaba en la otra posición podía recoger el brillo de la chispa con el cartón mojado entre la chispa y la fuente. Como los rayos N eran bloqueados por el agua, la chispa sería presumiblemente más débil cuando el cartón humedecido estaba entre ella y la fuente.

Mostraron a Wood un conjunto de placas que habían sido obtenidas de esta manera y se expuso una placa en su presencia. Todas tenían una imagen claramente más impresionada en el lado que no estaba apantallado por el cartón humedecido. En otras palabras, las placas parecían demostrar la existencia de la nueva radiación. Wood apuntó, sin embargo, que las fotografías habían sido todas tomadas "bajo condiciones que admitían muchas fuentes de error". El hecho de que el brillo de la chispa fluctuase de manera natural (en una cantidad que Wood estimó como hasta de un 25 por ciento) bastaba ya para hacer "imposible un trabajo preciso".

Además, en este experimento cada par de imágenes fotográficas se hacían exponiendo ambos lados de la placa fotográfica no una, sino varias veces, de manera que cualquier diferencia que hubiese entre los dos sectores del experimento –con o sin rayos N– quedaría intensificada. Se suponía que cada toma duraba cinco segundos, de suerte que el experimentador tenía que deslizar la placa de un lado a otro a intervalos de cinco segundos. Wood apuntó que este procedimiento introducía la posibilidad de errores sistemáticos: "Me parece bastante verosímil que la diferencia en el brillo de las imágenes sea debido a un favorecimiento acumulativo de la exposición de una de las imágenes, todo lo involuntario que se quiera, pero que puede venir gobernado por el conocimiento previo de la disposición del aparato."

Hasta ese momento ni los experimentadores de Nancy ni el escéptico Wood habían demostrado su punto de vista. Las placas fotográficas apoyaban la interpretación de Blondlot, pero Wood era "reacio... a creer que un cambio en intensidad que un ojo normal no puede detectar cuando los rayos están conectados o no apareciera tan claramente en las fotografías como las que presentaban las placas." Wood indicó que "fácilmente se podían diseñar experimentos que aclararían el asunto al margen de toda duda." Su propia sugerencia fue emplear dos pantallas en conexión con el dispositivo fotográfico de Blondlot, una "formada por dos hojas de fino aluminio con unas pocas hojas de papel mojado entre ellas y el conjunto herméticamente sellado con lacre a lo largo de sus bordes", y la otra "exactamente igual [pero conteniendo] papel seco." Según la hipótesis de Blondlot, la pantalla que tenía el papel mojado bloquearía los rayos N y la pantalla que contenía el papel seco los dejaría pasar. Wood pensaba que si "la persona que exponía las placas ignoraba qué pantalla se usaba en cada caso... las fotografías resultantes revelarían la verdad. Realmente, él se sentía "muy seguro que un día dedicado a un tal experimento mostraría que las variaciones en la densidad de la placa fotográfica no tendrían ninguna conexión con la placa usada."



R. W. WOOD (1868-1955) fue el físico que desacreditó los rayos N. Experto en óptica y espectroscopía, Wood desarrolló su actividad en la Johns Hopkins University. Aquí se le ve reflejado en un espejo formado por mercurio girando en un recipiente, un aparato que no tiene nada que ver con los rayos N.

El experimento siguiente que Wood observó, sin embargo, era bastante distinto del que él había pensado: se le mostró cómo los rayos N se desviaban cuando atravesaban un prisma de aluminio. En el aparato usado para demostrar este comportamiento, se hacían pasar los rayos N de una lámpara de Nernst primero a través de unas pantallas de hojas de aluminio, papel negro y madera (al objeto de que todos los tipos de radiación electromagnética, distintos de los rayos N, fuesen bloqueados) y después a través de una pantalla de cartón mojado en la que se había abierto una rendija vertical de unos tres milímetros de ancho. El chorro de rayos N que atravesaba la rendija incidía sobre el prisma que, según Blondlot, servía no sólo para curvar los rayos sino también para dispersarlos en un espectro. En otras palabras, ¡parecía haber rayos N de distintas longitudes de onda!

Para localizar la posición de los rayos desviados, Blondlot utilizaba un pequeño trozo de cartón seco montado en un soporte de acero curvado. En medio de este detector se aplicaba una estrecha banda de pintura fosforescente que podía moverse a lo largo del soporte mediante un tornillo que hacía desplazarse el dispositivo: un sistema diseñado originalmente para hacer muescas a distancias precisas. Las calibraciones del sistema de deslizamiento permitían medir con exactitud el lugar en que la banda pintada del detector sufría cambios de brillo, es decir, el lugar donde los rayos desviados incidían en el soporte. Blondlot y sus colegas aseguraban que al menos cuatro zonas de estas, o al menos cuatro diferentes longitudes de onda de los rayos N, podían identificarse mediante este método, y que, en cada zona, bastaba un movimiento del detector de no más de 0,1 milímetro para hacer que la banda fosforescente pasara de la oscuridad al brillo, y de nuevo a la oscuri-

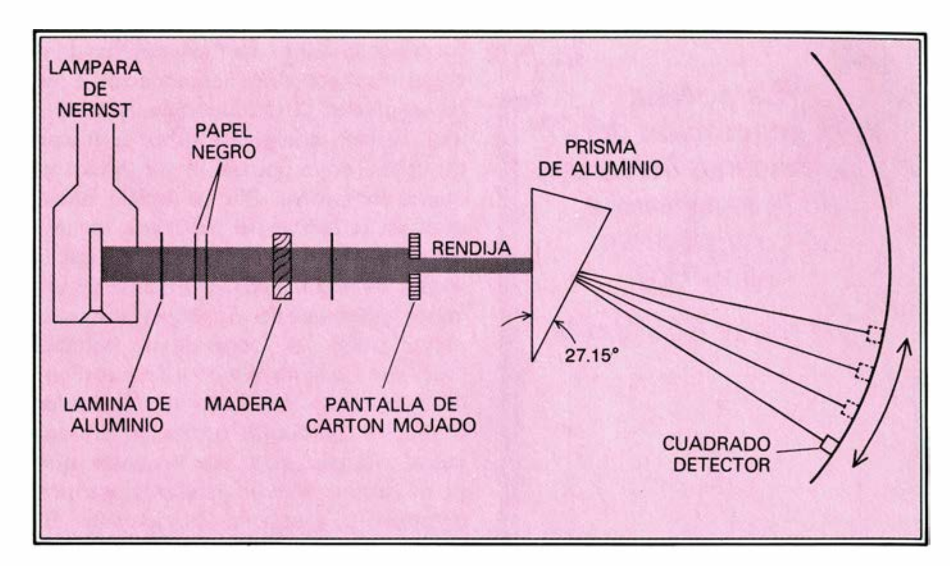
dad. Wood se sorprendió de que un haz proveniente de una abertura tan ancha (tres milímetros de anchura) pudiera resolverse en componentes tan finos (0,1 milímetro de ancho). Sus anfitriones le aseguraron que esto era una de las sorprendentes e inexplicables propiedades de los rayos N.

Cuando Wood movió el aparato de detección arriba y abajo del espectro de rayos N, fue incapaz de observar ningún cambio en el brillo de la banda fosforescente. Planeó entonces una jugada seria. A fin de que los cambios en la fosforescencia fueran visibles, el experimento tenía que realizarse en una habitación oscura; Wood pudo quitar así, subrepticiamente, el elemento más importante del aparato experimental: el prisma de aluminio. En el artículo de *Nature* escribió: "La supresión del prisma... no pareció interferir de ninguna manera en la posición de los máximos y mínimos del haz de rayos desviados (!)."

Wood pasó a continuación a discutir algunas de las propiedades aún más fantásticas que se atribuían a los rayos N. Por ejemplo, investigando los efectos de los rayos N en varias actividades fisiológicas, Charpentier había determinado que los rayos hacían agudizar los sentidos; conclusión esta última a que llegaron también a finales de 1904 Blondlot y sus colegas, posiblemente de un modo independiente. Presentaron a Wood una serie de experimentos encaminados a demostrar que la exposición a los rayos N aumentaba la agudeza visual.

En una habitación pálidamente iluminada se colocaba una ancha lima de acero —una fuente de rayos N— cerca de los ojos de un observador. En la pared de la habitación había un reloj. El realizador del experimento aseguró a Wood que las manecillas del reloj, que normalmente no se distinguían, se volvían brillantes y mucho más claras cuando la lima estaba cerca, un fenómeno atribuido al efecto peculiar de los rayos N sobre la retina. De nuevo Wood fue "incapaz de ver el menor cambio" Como la habitación no era completamente oscura, Wood no pudo hacer el mismo tipo de control del experimento que había hecho al quitar el prisma de aluminio. Pero se las ingenió de nuevo. "La sustitución por una pieza de madera del mismo tamaño y forma de la lima," escribía, "no interfirió en absoluto con el experiento." La sustitución se hizo, desde luego, sin que lo supiera el observador.

Wood estuvo unas tres horas observando varios experimentos con rayos N en el laboratorio de Blondlot. Al final se encontró "incapaz de referir una sola



REFRACCION DE LOS RAYOS N, demostrada por Blondlot con este aparato. La radiación de una lámpara de Nernst (una lámpara incandescente que se creía que emitía rayos N) se filtraba a través de pantallas de hojas de aluminio, papel negro y madera, al objeto de que todas las formas de radiación que no fuesen rayos N quedaran bloqueadas. Se utilizaba una pantalla de cartón humedecido, con una rendija vertical de unos tres milímetros de ancho, para dirigir un haz de los rayos sobre un prisma de aluminio con un ángulo de 27,15 grados. Según Blondlot, el prisma no sólo servía para curvar los rayos N, sino también para dispersarlos en un espectro, demostrando que habían rayos N de distintas longitudes de onda. Para detectar los rayos desviados Blondlot usaba un cuadrado de cartón con una banda fosforescente pintada en medio. El cuadrado podía moverse a lo largo del soporte de acero curvado en el que estaba montado mediante un deslizador con un tornillo graduado. Los cambios en la luminosidad de la banda pintada señalaban la localización del rayo refractado. Blondlot y sus colegas detectaban tales cambios en varios puntos del soporte de acero, y sus resultados fueron confirmados con una notable precisión por otros investigadores. Cuando Wood observó el experimento no pudo percibir ningún cambio en la luminosidad de la banda pintada. Como el experimento exigía una habitación oscura, quitó subrepticiamente el prisma del aparato, modificación ésta que no cambió la percepción de los rayos refractados por parte del experimentador. (Recreación de Gabor Kiss.)

observación que le pareciera indicar la existencia de los rayos." Más aún. "Se marchó con la firme convicción de que los pocos experimentadores que habían obtenido resultados positivos habían sido víctimas de algún tipo de ilusión." Muchos científicos de primera línea se habían mostrado ya incapaces de reproducir los resultados de Blondlot, y la publicación del informe de Wood sobre su estancia en el centro de investigación de rayos N puso, de hecho, punto final al apoyo a los rayos N fuera de Francia.

Los partidarios franceses de los rayos N continuaron sin embargo defendiéndose con energía. Después de todo, la existencia de los rayos había sido confirmada por 20 científicos franceses, entre los que se contaban figuras prestigiosas del rango de un Charpentier y Jean Becquerel, hijo del descubridor de la radiactividad, Henri Becquerel. Además, muchos otros habían sido testigos presenciales de varias manifestaciones de los rayos N en demostraciones hechas por Blondlot y sus seguidores en la Universidad de Nancy o en París. Tras la visita de Wood, Blondlot escribió desafiante: "Varios físicos eminentes que han tenido la gentileza de visitar mi laboratorio han presenciado [los experimentos de detección fotografica]. De... cuarenta experimentos uno falló... Yo creo que este fallo, único, nótese, se debió a una regulación insuficiente de la chispa, que sin duda no era sensible."

A pesar de todo Blondlot se esforzó por responder a las críticas de Wood de sus métodos experimentales. Wood había sugerido que las pruebas fotográficas que apoyaban la existencia de los rayos N podían deberse a fluctuaciones naturales en el brillo de la chispa del detector y a irregularidades en los tiempos de exposición. En 1905 Blondlot describió nuevos procedimientos para controlar los tiempos de exposición automáticamente y para regular la estabilidad de la chispa por medio de un receptor telefónico insertado en la fuente de potencia. Además, para las imágenes tomadas en ausencia de rayos N empezó a distribuir primas de tiempo: aumentos en los tiempos de exposición de entre 0,5 segundos y 1,5 segundos. Pronto, después de introducir numerosas comprobaciones y precauciones tales como éstas, Blondlot presentó un gran número de nuevas fotografías demostrando una vez más que los rayos N producían un sorprendente aumento en la intensidad de la chispa.

En 1905 Blondlot publicó asimismo un elaborado conjunto de instrucciones acerca de cómo observar mejor las manifestaciones de los rayos N: era esencial

en estos experimentos evitar todo esfuerzo de la visión, ya fuese deliberado o como resultado de la acomodación a los bajos niveles de iluminación, y obviar toda fijación consciente sobre la fuente luminosa cuya variación de brillo se quería comprobar. Por así decirlo, había que ver la fuente sin mirarla e incluso dirigir la vista en una dirección ligeramente distinta. Se requería que el observador desempeñara un papel absolutamente pasivo, so pena de no percibir nada útil. Se tenía que guardar un silencio poco menos que religioso. Cualquier humo, en particular humo de tabaco, debía evitarse, pues era probable que perturbara o incluso enmascarase por completo el efecto de los rayos N. El propio observador tenía que acostumbrarse a mirar a un detector luminoso como si fuera un pintor, especialmente un pintor impresionista, que mirase el paisaje. El adquirir tales habilidades exigía práctica y seguramente no sería fácil. Y cabía esperar que algunas personas no lograran adquirirlas nunca.

Así, según Blondlot y sus discípulos, en críticas como las de Wood no se cuestionaba tanto la validez del fenómeno cuanto la sensibilidad del observador. (Una apreciación que no será desconocida para aquellos que han seguido las más recientes controversias en torno a la percepción extrasensorial.) En 1905, cuando sólo quedaban científicos franceses en el campo de los rayos N, el argumento empezó a adquirir un aspecto algo chauvinista. Algunos defensores de los rayos N mantenían que sólo las razas latinas poseían las sensibilidades (tanto intelectuales como sensoriales) necesarias para detectar las manifestaciones de los rayos. Se argüía que los poderes de percepción anglosajones estaban anulados por la continua exposición a la niebla y los teutónicos embotados por la pertinaz ingestión de cerveza.

En honor a la verdad, los científicos franceses merecen una gran parte del mérito del desbancamiento de los rayos N. Ningún país, desde luego, recibió el descubrimiento de Blondlot con más entusiasmo que Francia, pero tan pronto como los experimentos realizados con precauciones similares a las que sugirió Wood no lograron producir ninguna señal de los rayos, los científicos franceses empezaron a mirar más críticamente las descripciones publicadas de los experimentos positivos. En seguida se hizo evidente una sorprendente coincidencia: había una curiosa localización de resultados positivos en las proximidades de Nancy. (Los hallazgos procedentes del laboratorio de Jean Becquerel de París fueron una excepción a esta regla, pero perdieron credibilidad cuando Becquerel informó que podía evitar que las piezas metálicas emitieran rayos N "anestesiándolas" con cloroformo.)

Por último, la revista francesa *Revue scientifique*, cuya dirección se mostraba particularmente sensible al posible desdoro que, para la ciencia francesa, representaban los rayos N, puso su empeño en resolver la cuestión de una vez por todas. Además de proporcionar un foro para discutir la investigación sobre rayos N, la revista hizo un valiente esfuerzo para presionar a Blondlot a que realizara una prueba definitiva de la existencia de los rayos. Recogiendo la sugerencia de varios físicos, la revista propuso que se presentaran a Blondlot dos pequeñas cajas de madera, una que contuviera un trozo de acero templado (una fuente declarada de rayos N) y, la otra, un trozo de plomo. Los pesos de las cajas serían idénticos, de manera que una vez que las cajas se sellaran serían indistinguibles excepto por un número de identificación. En otras palabras, no sería posible que nadie, salvo la persona que hizo y numeró las cajas, dijera cuál contenía la fuente de rayos N. Se requeriría a Blondlot para que, usando un detector de chispas o un aparato de detección fosforescente, determinara qué caja emitía rayos N, es decir, cuál contenía el acero templado.

Blondlot tardó mucho tiempo en responder a la propuesta. Por fin, en 1906, escribió: "Permítaseme declinar por completo su proposición de cooperar en este experimento simplista; los fenómenos son demasiado delicados para ello. Déjese a cada uno formar su opinión personal acerca de los rayos N, ya sea a partir de sus propios experimentos o a partir de los de otros en los cuales tenga confianza."

Y eso fue exactamente lo que sucedió. La ciencia no tiene un vicario en la tierra para vigilar la doctrina ni un concilio central para proclamar el dogma. En general la evolución de las teorías científicas parece seguir, no obstante, un esquema que bien podríamos describirlo con un aforismo atribuido a James Clerk Maxwell, fundador de la teoría matemática del electromagnetismo. Se cuenta que Maxwell dijo en una lección introductoria sobre la luz: "Hay dos teorías sobre la naturaleza de la luz, la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria; solíamos creer en la teoría corpuscular; ahora creemos en la teoría ondulatoria porque todos aquellos que creían en la teoría corpuscular han muerto."

Blondlot murió en Nancy en 1930.

Juegos matemáticos

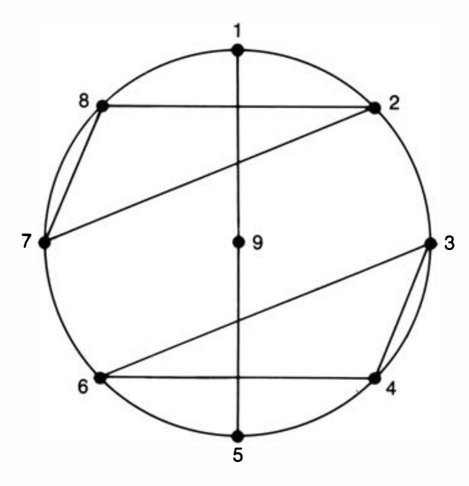
¿Pueden recibir invitados, colegialas y presos encadenados idéntico trato?

Martin Gardner

Una señora se dispone a invitar a cenar a 15 amigos suyos. Tiene la intención de sentar a su mesa cada día a tres de ellos, y así durante 35 días, pero quiere organizar los grupos de forma que nunca un mismo par de personas sea invitado más de una vez. ¿Podrá realizarse este proyecto?

Esta cuestión, y otras semejantes, pertenecen al vasto dominio de la combinatoria que se conoce por teoría de diseño por bloques, y durante el siglo pasado fueron ya extensamente analizadas, sobre todo con fines recreativos. Más tarde llegaron a tener importante papel en estadística, especialmente para diseño de experimentos científicos. Una de las ramas menores de la teoría se ocupa de los sistemas ternarios de Steiner; el problema de los invitados es ejemplo sencillo. Jakob Steiner, geómetra suizo del siglo XIX, fue pionero del estudio de estos problemas.

Con toda generalidad, un sistema ternario de Steiner es una distribución de n objetos en ternas de forma que cada par de objetos aparezca una y exactamente una vez en alguna terna. Es fácil demostrar que el número de pares es $1/2n(n-1)$, y que el número de ternas necesarias es la tercera parte del número de pares, es decir, $(1/6)n(n-1)$. Evidentemente, sólo podremos tener sistemas ternarios de Steiner cuando estos dos números sean ambos enteros, lo que sucede cuando n es congruente a 1 o 3 módulo 6, o sea, cuando dividiendo n entre 6 el resto sea 1 o 3. Por consiguiente, la sucesión de valores admisibles para n será 3, 7, 9, 13, 15, 19, 21 y sucesivos.



Disco para las colegialas de Kirkman, caso **n** *= 9*

Con sólo tres invitados, el problema de las cenas tiene solución trivial: todos asisten el mismo día. Como las ternas de Steiner no están ordenadas, la solución es, evidentemente, única. También para siete invitados es única la solución: (1,2,4), (2,3,5), (3,4,6), (4,5,7), (5,6,1), (6,7,2) y (7,1,3). Tanto el orden de enumeración de las ternas como el de los números que las componen pueden permutarse a voluntad sin modificar la esencia del sistema. Además, también los números pueden intercambiarse entre sí. Para comprender este aspecto, imaginemos que las personas que van a ser invitadas lleven un botón con su número grabado en él. Si dos o más de estas personas truecan entre sí sus botones, la nueva combinación ha de considerarse idéntica a la anterior.

De forma análoga, para nueve invitados la solución es única; para 13, existen dos soluciones, y para 15, se sabe desde hace mucho que hay 80 soluciones fundamentales. Para los valores de n mayores que 15 de la sucesión de valores admisibles, se desconoce cuál sea el número de soluciones distintas, si bien se ha podido demostrar que existen soluciones en todos los casos. Para $n = 19$ se sabe que hay centenares de miles de soluciones.

Para darles mayor interés, complicaremos un poco los sistemas de Steiner. Supongamos ahora que la anfitriona proyecte invitar a la totalidad de sus 15 amigos durante todos los días de una semana, sentándolos a cinco mesas por grupos de tres, aunque respetando la condición de que cada par de sus conocidos coincida en una misma mesa solamente una vez.

Nuestro nuevo problema es equivalente a uno de los más famosos rompecabezas de la historia de la matemática combinatoria, el problema de las colegialas de Kirkman, así llamado en honor del reverendo Thomas Penyngton Kirkman, un aficionado británico a la matemática, quien durante más de 50 años fue párroco de la iglesia de Croft, en Lancashire. Aunque de formación matemática enteramente autodidacta, sus descubrimientos fueron tan variados y diversos que llegó a ser elegido miembro de la Royal Society. Sus trabajos no sólo tuvieron trascendencia en combinatoria, sino también en las teorías de nudos, grupos finitos y cuaternios. En geometría proyectiva hay una famosa configuración, llamada hexagrama mágico de Pascal (seis puntos situados sobre una cónica, unidos mediante rectas de todos los modos posibles); ciertas intersecciones de esta configuración reciben todavía el nombre de "puntos de Kirkman".

Kirkman alcanzó celebridad por su incisivo sarcasmo, que con frecuencia hizo blanco en las teorías filosóficas de Herbert Spencer. Su parodia del concepto de evolución según Spencer ha sido citada con frecuencia: "Un cambio desde una semejanza sin como discursivo hasta una no sibisemejanza de alguna forma descriptible en términos generales, a través de continuas altercosificaciones y permaterializaciones iterativas".

Kirkman publicó inicialmente su problema de las colegialas en 1847, en una revista británica de matemática. El problema volvió a aparecer en *The Lady's and Gentleman's Diary for the Year 1850*. He aquí cómo lo expuso. Todos los días de la semana, una maestra lleva de paseo a 15 niñas. Durante el paseo las niñas van en grupos de tres. ¿Podrá la maestra organizar los grupos de forma que al cabo de siete paseos cada par de niñas haya estado en el mismo trío una y solamente una vez?

Como es obvio, toda solución de este problema ha de ser sistema ternario de Steiner; pero de las 80 soluciones fundamentales correspondientes a $n = 15$, solamente siete dan soluciones básicas del problema de las colegialas. Los sistemas ternarios que cumplan el requisito extra de que las ternas estén agrupadas de modo que en cada agrupación figuren todos los objetos se llaman diseños de Kirkman.

Lo mismo que antes, el número de pares de alumnas es $1/2\ n(n-1)$ y el número de días necesarios para los paseos, $1/2(n-1)$. Estos valores solamente son ambos enteros cuando n sea múltiplo impar de 3. Por tanto, la sucesión de posibles valores es 3, 9, 15, 21, y sucesi-

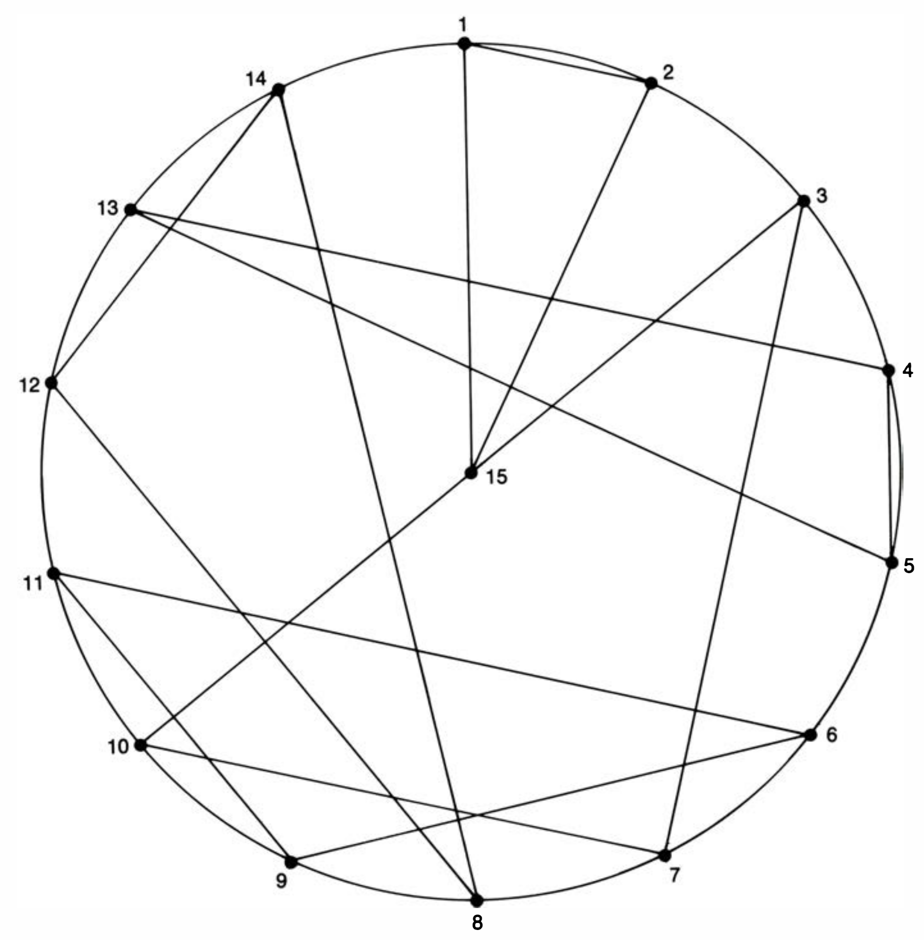
vos, es decir, la obtenida suprimiendo el segundo de cada par de números de la sucesión correspondiente a los sistemas de Steiner. ¿Habrá soluciones para todos los números de la nueva sucesión? Desde los días en que Kirkman la suscitó han corrido ríos de tinta dedicados a esta cuestión, y en ellos han mojado sus plumas no pocos matemáticos eminentes. El caso $n = 3$ sigue siendo trivial: sencillamente, las tres niñas salen de paseo. El caso de nueve niñas y cuatro días tiene solución única:

123	147	159	168
456	258	267	249
789	369	348	357

Al igual que en los sistemas de Steiner, los números de las ternas no están ordenados, y por tanto, poco importa cómo se los permute, cómo se dispongan las ternas de cada grupo, ni cómo se intercambien los dígitos entre sí. Todas las variantes producidas mediante tales permutaciones son consideradas como una misma solución.

Hay muchos métodos novedosos –entre ellos algunos de carácter geométrico– para construir diseños de Kirkman. He aquí uno que hubiera hecho las delicias de Ramón Llull, teólogo mallorquín del siglo XIII, en cuya *Ars Magna* explora combinaciones de símbolos valiéndose de discos giratorios concéntricos. Para hallar una solución del caso $n = 9$ se traza una circunferencia y, equidistantes y alrededor de ella, se anotan los números de 1 a 8. Sobre este disco se superpone concéntricamente otro del mismo radio recortado en cartulina, y se atraviesan los centros de ambos con un alfiler. El centro del disco superior se marca con un 9, y sobre él se dibujan un diámetro y dos triángulos escalenos, como vemos en la ilustración de la página anterior.

Hagamos ahora girar el círculo paso a paso en uno de los dos sentidos, situándolo en cuatro posiciones diferentes (el quinto paso no haría sino reproducir la situación de partida). En cada paso se copian la terna indicada por los extremos del diámetro y su centro, y las indicadas por los vértices de ambos triángulos. Las tres ternas correspondientes a cada una de las cuatro posiciones del disco dan los grupos correspondientes a cada uno de los cuatro días de paseo. La solución así obtenida parece a primera vista distinta del diseño presentado ya como solución al problema, pero poniendo un 2 en lugar del 5, 3 en lugar de 7, 4 en vez de 9, 5 en lugar de 3, 6 donde haya un 8, 7 donde figure 6, 8 donde 4, y 9 en lugar de 2 (el 1 permanece invariable), se obtiene un diseño idéntico al dado. La otra única forma de trazar triángulos sobre el disco con el fin de engendrar nuevas soluciones sería tomar la figura simétrica de la dada en la ilustración. Pero tal proceder no genera nuevos diseños.



Disco para las colegialas de Kirkman, **n** *= 15*

Se sabe desde el año 1922 que el caso $n = 15$ admite siete soluciones fundamentales. Podemos generarlas mediante distintas plantillas de triángulos, unas con, y otras sin, segmento diametral. En la ilustración superior, vemos una plantilla con cinco triángulos. En este caso es preciso girar el disco dos pasos por vez, haciéndolo ocupar siete posiciones distintas. En cada posición, los vértices de los triángulos dan los cinco tríos correspondientes a esa fecha.

Es preciso observar que en estos discos ningún par de triángulos pueden ser congruentes, pues entonces en el diseño global aparecerían ternas repetidas. Sobre diseños de Kirkman, es obligado referirse al capítulo 10 de la undécima edición de los *Mathematical Recreations & Essays*, de W. W. Rouse Ball, revisada por H. S. M. Coxeter. Este mismo capítulo de la duodécima edición (University of Toronto Press, 1974) es también de gran valor. En la nueva versión, enteramente redactada por Coxeter, el examen de los primeros pasos de la teoría de diseños ha sido sustituido por una discusión de cómo la teoría enlaza con las geometrías afín y proyectiva, las matrices de Hadamard, los códigos de corrección de errores, los cuadrados latinos y las geometrías de dimensión mayor que tres.

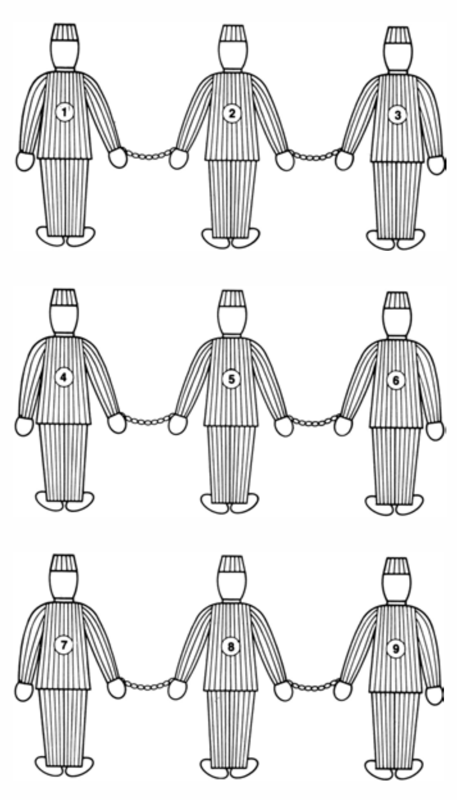
¿Existen diseños de Kirkman para todos los valores admisibles de n? Sorprendentemente, esta cuestión permaneció abierta hasta 1970. En esa fecha, D. K. Ray-Chaudhuri y Richard M. Wilson, de la Universidad estatal de Ohio, demostraron que la respuesta es afirmativa. Empero, el número de soluciones sigue sin conocerse cuando n es mayor que 20. Puede verse la demostración en "Solution of Kirkman's Schoolgirl Problem", en *Combinatorics* (*Proceedings of Symposia in Pure Mathematics*, vol. 19, págs. 187-203; 1971).

Los diseños de Kirkman tienen numerosas aplicaciones prácticas. He aquí una forma típica de usar el diseño de $n = 9$ en un experimento biológico. Imaginemos que un investigador se proponga estudiar el efecto de nueve entornos ambientales sobre un determinado animal. Hay cuatro variedades del ani-

mal; cada animal concreto puede verse afectado de distinta forma según sea joven, plenamente adulto o viejo. Cada variedad es asignada al azar a uno de cuatro grupos. Cada grupo está formado por tres ternas, y cada una de éstas, constituida por animales tomados al azar, uno en cada categoría de edad. Ahora cada animal es asignado a uno de los nueve ambientes conforme a la pauta de nueve números de su grupo. Así diseñado el experimento, es posible analizar estadísticamente sus resultados de forma muy simple, con objeto de determinar la influencia del medio pese a las diferencias de edad y de variedad de los animales.

Ya he explicado que al introducir Kirkman una condición más, los sistemas ternarios de Steiner originaron una nueva categoría de diseño por bloques. En 1917, el genial problemista inglés Henry Ernest Dudeney impuso una nueva restricción sobre los diseños de Kirkman, suscitando así un nuevo problema de diseño por bloques (véase el problema 272 de los *Amusements in Mathematics* de Dudeney y el problema 287 de su obra póstuma *Puzzles and Curious Problems*).

"Había una vez", comienza la segunda línea del cuento-problema de Dudeney, "nueve presos de carácter especialmente peligroso, a quienes era preciso vigilar muy de cerca. Todos los días laborables se les sacaba al patio a hacer ejercicio, esposados entre sí como muestra el dibujo trazado por uno de los guardianes [*véase la ilustración de esta página*]. No puede tolerarse que un mismo par de presos sean encadenados juntos dos días de una misma semana. Se podrá ver cómo salieron el lunes. ¿Sabría Vd. agrupar en terna los nueve presos durante los cinco días restantes? Puede verse que el número 1 no puede ser otra vez esposado con el número 2, (por ninguno de los lados), ni el número 2 ser encadenado con el número 3, aunque, desde luego, sí pueden juntarse el número 1 y el número 3. Por tanto, el problema es enteramente diferente del ya clásico de las 'quince colegialas'; sin duda resultará fascinante analizarlo. El tiempo de ocio invertido en hallar su solución se verá generosamente reembolsado".



Problema de los presos encadenados, **n** = *9*

Dudeney dio una solución, pero no explicó cómo llegar a ella ni cómo hallar otras análogas. Felizmente, es posible descubrirlas valiéndose de dos ruedas, por una técnica llulliana. Vemos una pareja de muestra en la ilustración superior de la página siguiente. Cada disco se hace girar, por ejemplo, en sentido horario, tres pasos por vez. En cada paso los vértices de los triángulos generan una terna, pero hay que tener la precaución de que el número central de la terna sea el indicado por el vértice marcado con un punto.

Cada disco genera los tres grupos mostrados bajo él. En ambas series los grupos son cíclicos, en el sentido de que sumando 3 (módulo 7) a cada número del primer grupo se obtiene el segundo. Análogamente, el segundo grupo engendra al tercero, y éste, a su vez, el primero. La solución no comienza con la disposición dada por Dudeney para el primer día, pero es fácil conseguir que así suceda intercambiando las cifras entre sí.

Tras haber dado su solución del problema, Dudeney se guaseaba: "Si el lector desea un rompecabezas difícil que lo mantenga embebido en las largas tardes de invierno, que pruebe a agrupar veintiún presos de forma que todos puedan pasear, esposados en tríos como se ha explicado, durante quince días, sin que ningún par de ellos estén encadenados entre sí más de una vez. Por si llegase a formarse la opinión de que es imposible, añadiremos que tenemos escrita una solución impecable. ¡Pero es hueso duro!

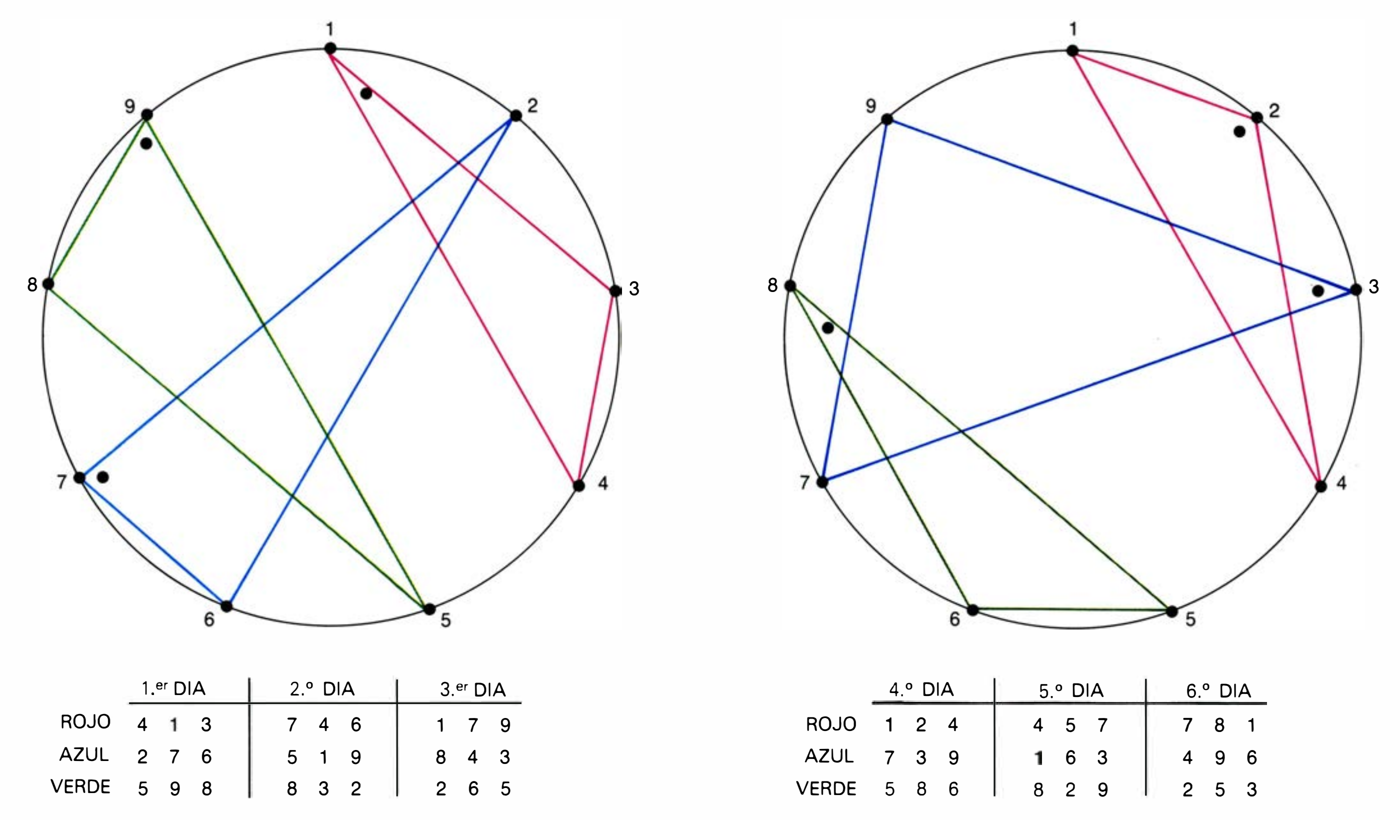
¡Y tan duro! Que yo sepa, la primera vez que ha llegado a publicarse una solución ha sido en el artículo de Pavol Hell y Alexander Rosa titulado "Graph Decompositions, Handcuffed Prisoners and Balanced *P*-Designs", en *Discrete Mathematics* (vol. 2, n.º 3, págs. 229-252; junio, 1972).

Antes de presentar la solución me gustaría hacer algunas observaciones de carácter general sobre el problema de los presos encadenados. Lo mismo que en los sistemas ternarios de Steiner y los diseños de Kirkman, el número de pares de presos es $(1/2)n(n-1)$, pero la nueva restricción (¡las manillas!) prolonga el número de días a $(3/4)(n-1)$. Sólo podrá existir solución si esta cantidad es entera, lo que exige que n sea uno de los valores de la sucesión formada por exactamente la mitad de los valores admisibles para diseños de Kirkman, a saber, 9, 21, 33, 45, 57, 69, 81, 93,... y así sucesivamente. La diferencia entre términos consecutivos es siempre 12.

En 1971, Charlotte Huang y Alexander Rosa publicaron una clasificación de 334 soluciones básicas, correspondientes al caso $n = 9$. Empero, cuando Dame Kathleen Ollerenshaw y el cosmólogo Hermann Bondi fueron comprobando las soluciones una por una, descubrieron, entre las 334, dos repeticiones. Se cree ahora que el verdadero número de soluciones es 332; se ignora el número de soluciones cuando n toma valores mayores que 9. En opinión de Rosa, para $n = 21$ deben existir millones. Hell y Rosa han probado que existen soluciones para infinitos valores de n y han puesto a punto técnicas para hallar soluciones cíclicas para todos los valores de n admisibles y menores que 100, exceptuados 57, 69 y 93. Wilson (el mismo que contribuyó a liquidar el problema de las colegialas) ha demostrado que existe solución para todos los n admisibles, pero su trabajo aún no ha sido publicado.

La ilustración inferior de la página siguiente muestra una solución cíclica descubierta por Hell y Rosa para el caso $n = 21$. Los siete primeros días forman una serie cíclica que puede ser generada mediante un disco provisto de siete triángulos, cuyos vértices se corresponden con las ternas que encabezan el diseño de cada día. El disco se hace girar tres pasos por vez. Un segundo disco, también provisto de siete triángulos, genera de forma análoga los siete días siguientes; el décimoquinto día tiene el diseño que vemos en la ilustración. En ambas series cíclicas, el diseño de cada día puede transformarse en el del día siguiente sumando 3 (módulo 21) a cada número. Haciendo lo mismo con el diseño correspondiente al último día se retorna al día primero. Hell y Rosa dan soluciones parecidas para los casos de $n = 33$ y $n = 45$.

Tanto el problema de las colegialas como el de los presos puede generalizarse a cuartetos, quintetos, sextetos, etcétera. Tales generalizaciones nos aden-



	1.er DIA	2.° DIA	3.er DIA	4.° DIA	5.° DIA	6.° DIA
ROJO	4 1 3	7 4 6	1 7 9	1 2 4	4 5 7	7 8 1
AZUL	2 7 6	5 1 9	8 4 3	7 3 9	1 6 3	4 9 6
VERDE	5 9 8	8 3 2	2 6 5	5 8 6	8 2 9	2 5 3

Solución para presidiarios esposados, **n** = *9*

tran en profundos enigmas de la combinatoria, muchos de ellos lejos de estar resueltos.

En los libros de problemas pueden verse centenares de rompecabezas emparentados con éstos, que suelen ir acompañados de historietas más o menos pertinentes sobre campeonatos de algún juego, disposiciones de asientos, pertenencia a comisiones y otros esquemas de carácter combinatorio. Por ejemplo, suelen consultarme cómo organizar a n miembros de un club de bridge (n ha de ser múltiplo de 4) de forma que puedan reunirse diariamente durante $n-1$ días en $n/4$ mesas de juego, de manera que cada jugador forme pareja con cada uno de los restantes exactamente una vez, y se enfrente a cada uno de los otros jugadores dos veces exactamente.

Aunque este problema parezca muy sencillo, en realidad es tan espinoso que no quedó enteramente resuelto hasta hace pocos años. El análisis más completo puede verse en "Whist Tournaments", artículo de Ronald D. Baker, de la Universidad de Delaware. (El artículo forma parte de los *Proceedings of the Sixth Southeastern Conference on Combinatorics, Graph Theory and Computing,* publicados en 1975 por Utilitas Mathematica, Winnipeg, como volumen 14 de la serie *Congressus Numerantium.*) En su artículo, Baker muestra cómo obtener soluciones para todo valor de n, exceptuados 132, 152, 264. Desde aquella fecha, el matemático israelí Haim Hanani ha conseguido "hincarle el diente"

1	2	3	4	5	6	7
1 8 18	4 11 21	7 14 3	10 17 6	13 20 9	16 2 12	19 5 15
2 4 20	5 7 2	8 10 5	11 13 8	14 16 11	17 19 14	20 1 17
3 7 15	6 10 18	9 13 21	12 16 3	15 19 6	18 1 9	21 4 12
10 11 6	13 14 9	16 17 12	19 20 15	1 2 18	4 5 21	7 8 3
5 16 21	8 19 3	11 1 6	14 4 9	17 7 12	20 10 15	2 13 18
19 9 17	1 12 20	4 15 2	7 18 5	10 21 8	13 3 11	16 6 14
13 12 14	16 15 17	19 18 20	1 21 2	4 3 5	7 6 8	10 9 11

8	9	10	11	12	13	14	15
1 4 19	4 7 1	7 10 4	10 13 7	13 16 10	16 19 13	19 1 16	1 3 2
7 16 9	10 19 12	13 1 15	16 4 18	19 7 21	1 10 3	4 13 6	4 6 5
10 2 6	13 5 9	16 8 12	19 11 15	1 14 18	4 17 21	7 20 3	7 9 8
13 17 8	16 20 11	19 2 14	1 5 17	4 8 20	7 11 2	10 14 5	10 12 11
11 14 20	14 17 2	17 20 5	20 2 8	2 5 11	5 8 14	8 11 17	13 15 14
5 12 21	8 15 3	11 18 6	14 21 9	17 3 12	20 6 15	2 9 18	16 18 17
3 18 15	6 21 18	9 3 21	12 6 3	15 9 6	18 12 9	21 15 12	19 21 20

Solución para presidiarios esposados, **n** = *21*

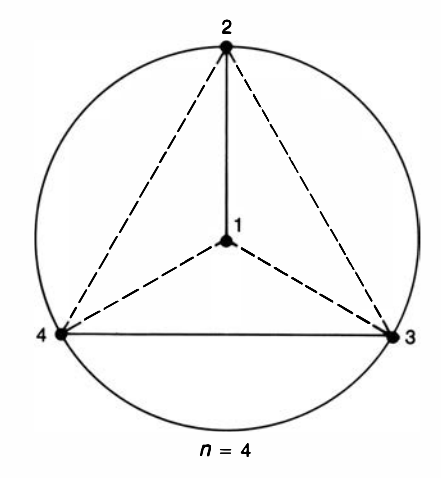
al caso n = 132, y Baker y Wilson han liquidado los casos n = 152 y n = 264. Baker y Wilson publicarán pronto un análisis detallado de estos tres casos.

Para muchos valores de n es posible generar soluciones mediante discos giratorios. La ilustración de esta misma página muestra discos idóneos para n = 4 y n = 8. La técnica para ir generando soluciones es bien sencilla: se traza una recta desde *1* (centro del disco) hasta *2*. Se dibuja después otra recta que conecte otro par de números. Los extremos de cada segmento son parejas de jugadores; los pares de parejas son contrincantes en una misma mesa. De haber una segunda mesa, se unirían mediante líneas de color dos pares de números más, que indican la disposición de las parejas enfrentadas en la segunda. Si hubiera más mesas se utilizarían nuevos colores.

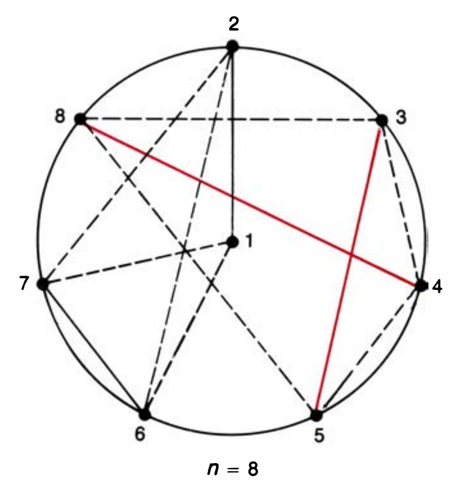
Las soluciones generadas aplicando esta técnica serán cíclicas cuando, y solamente cuando, se cumplan dos condiciones. Primera, ningún par de líneas puede ser de la misma longitud (la longitud se mide por el número de unidades que la recta subtiende en la circunferencia). Exceptuando el radio, las longitudes habrán de ser enteros consecutivos que empiecen por 1 y terminen en $(1/2)n-1$. Segunda, si todos los contrincantes de cada mesa se enlazan por rectas (dibujadas de trazos en la ilustración), cada longitud aparecerá sobre el diseño solamente dos veces.

Para ir situando las líneas se opera fundamentalmente por tanteo. No se conoce ningún procedimiento que garantice para todo valor de n configuraciones correctas. Una vez hallada una disposición aceptable, tendremos el orden de encuentros del primer día. Girando el disco, un paso por vez, se van engendrando los órdenes en que se enfrentan los jugadores durante los restantes días. Todas las columnas del diseño final son cíclicas, por lo que una vez determinadas las posiciones del primer día, las de días sucesivos pueden determinarse rápidamente, sin necesidad de hacer girar el disco. Las soluciones de los casos n = 132, n = 152 y n = 264, no publicadas todavía, no son cíclicas, pero tal vez sea posible presentarlas en forma cíclica permutando entre sí los números. En opinión de Baker, seguramente existan soluciones cíclicas para todos los valores de n, si bien no se conoce ningún algoritmo general para encontrarlas.

Y ahora, un grato problema, que resolveremos el mes que viene ¿Sabrá el lector diseñar un disco para un torneo de bridge con 12 jugadores, capaz de engendrar un campeonato que reúna todas las condiciones deseadas?



DIAS	MESA 1	
1	12	34
2	13	42
3	14	23



DIAS	MESA 1		MESA 2	
1	12	67	35	48
2	13	78	46	52
3	14	82	57	63
4	15	23	68	74
5	16	34	72	85
6	17	45	83	26
7	18	56	24	37

Campeonatos de bridge, casos **n** = *4 y* **n** = *8*

Cuando el pasado mes de febrero propuse un problema sobre un tren que recorría 500 kilómetros, no debí dejar que el tren hiciese paradas por el camino. Muchos lectores me han hecho notar que, si se detiene, el tiempo empleado por el tren para recorrer un segmento de 50 kilómetros ya no será función continua de la posición del origen del segmento al ir viajando el tren desde un extremo a otro del trayecto.

Si en lugar de ir haciendo deslizar sobre la vía una varilla de 50 kilómetros se desplazase a lo largo del eje de tiempos del diagrama espacio-temporal un segmento de una hora de duración, sí podríamos demostrar que debe existir una tal duración durante la cual el tren solamente se mueve 50 kilómetros, admitiendo no sólo detenciones, sino también retrocesos. Empero, no se puede decir que siempre habrá un tramo de 50 kilómetros que es recorrido exactamente en una hora.

Para aclarar esta cuestión, supongamos que el tren viajase siempre con velocidad constante de 100 kilómetros por hora, y que a mitad de camino hiciese una parada de cinco horas. Durante los últimos 30 minutos anteriores a la detención, el tren recorrió 50 kilómetros. Estando el tren completamente inmóvil, el maquinista, pendiente del reloj, podría declarar con verdad que durante la hora el tren ha recorrido 50 kilómetros cuando se cumpliesen los 30 minutos de detención. Pero sería un sofisma decir que el tren viajó con velocidad media de 50 kilómetros por hora, pues una fracción de segundo más tarde la velocidad media correspondiente *a ese mismo tramo* ya habría disminuido, y continuará decreciendo hasta que el tren arranque otra vez.

En la nota que sobre el malhadado "problema imposible" dí el mes de abril prometí una reseña más amplia. Muchos lectores prepararon programas de ordenador que muestran cómo al ir elevando por encima de 100 la cota superior van apareciendo continuamente nuevas soluciones. El siguiente par de números es 4 y 61. Por tanto, no es cierto que, independientemente de la cota superior, 4 y 13 sean la única posible solución.

Un programa preparado por David Pearson, del Dartmouth College, fue capaz de detectar 78 pares de números que resuelven el problema, manteniendo la suma de ambos menor que 2000 y la cota superior adecuadamente alta. En

todos estos casos, el menor de los números es potencia de 2, y exceptuando cinco, en todos ellos el mayor de los números es primo. Se ha conjeturado que el menor de los números ha de ser potencia de 2, pero no he visto ninguna demostración de ello. Además, tampoco se ha demostrado que eliminando la cota superior el número de soluciones sea infinito.

Un corresponsal de Amsterdam, Robert W. van der Waall, me envió copia del problema tal como fue presentado por Hans Freudenthal en la revista de matemáticas *Nieuw Archief Voor Wiskunde* (serie 3, vol. 17, pág. 152, 1969, y también, vol. 18, págs. 102-106, 1970). No sé de referencias más tempranas.

En la sección de agosto del año pasado analicé el problema de situar n superdamas (la superdama, o amazona, es una pieza que suma en sí los movimientos de la dama y el caballo de ajedrez) sobre un tablero de n^2 casillas, de forma que ninguna pieza amenace a ninguna otra. Cuando n sea mayor que 9 se ha demostrado que han de existir soluciones para todos los n que no sean de la forma $(12k + 8)$ o $(12k + 9)$, siendo k un entero. Dicho de otra forma, no se ha demostrado que existan soluciones para los valores de n pertenecientes a la sucesión 20, 21, 32, 33, 44, 45, 56, 57 y sucesivos. Numerosos lectores, imposibles de citar aquí, han enviado soluciones para los seis primeros valores de esta sucesión. J. Reineke y P. Päppinghaus, de la Universidad de Hannover, enviaron soluciones para todos los valores de n hasta 69 incluido; por ello, el primer caso aún no resuelto es $n = 80$.

Muchos lectores de la sección de marzo han comunicado una segunda solución del problema de cómo una dama negra puede hacer tablas contra dos damas blancas, en una posición donde las blancas jugaban primero. Yo debería haber añadido "sin perder inmediatamente una de ellas". Sin esta premisa, hay dos soluciones triviales, además de la presentada en abril. Una solución adopta la forma de blancas en 10 y 19 y negra en 15, entre las otras dos. La otra solución tiene las blancas en 30 y 21, pongamos por caso, y las negras en 22.

John Harris estuvo trabajando en el problema de transferir lícitamente las piezas blancas a la posición inicial de las negras, y recíprocamente, con número mínimo de jugadas. Ha conseguido rebajar la marca de 172 que yo di a sólo 160. Incidentalmente, también se debe a Harris la solución de la otra tarea que allí mencioné: intercambiar las posiciones de forma que al final los 24 peones sean damas. Su marca, 180 jugadas (90 por bando), aún no ha sido batida.

Taller y laboratorio

Fantasías en la nieve: más pasatiempos con el punteado caótico de las pantallas de televisión

Jearl Walker

El mes pasado les describí las ilusiones ópticas que pueden experimentarse al contemplar el punteado caótico, o "nieve", que se forma en la pantalla de un televisor cuando el aparato se sintoniza con un canal que no está emitiendo. De alguna manera, nuestro sistema visual organiza estas imágenes aleatorias en movimientos y figuras coherentes. Cómo lo hace es algo que no se conoce muy bien.

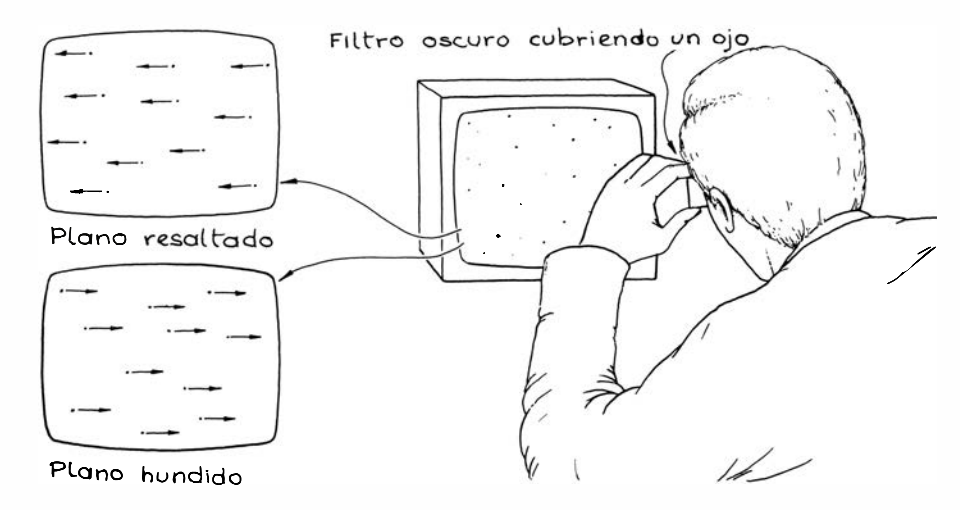
Hay otro tipo de organización del ruido caótico de las pantallas de televisión que se ha investigado durante los últimos años y que se conoce mejor. Al contemplar el ruido visual con un ojo cubierto por un filtro oscuro, pero no opaco, la nieve puede separarse en dos capas que se mueven en sentidos contrarios y aparentan encontrarse a distintas profundidades. Una de las capas parece como hundida en la pantalla, con la nieve moviéndose desde el ojo tapado hacia el descubierto. La otra capa sobresale de la pantalla y la nieve se desplaza en sentido contrario. La velocidad media a través de nuestro campo visual es de cinco a diez grados por segundo. Hay observadores que tienen dificultades para percibir la ilusión y otros muchos detectan más de dos capas.

Este efecto lo han clasificado algunos investigadores dentro de la categoría general de ilusión de Pulfrich, de la que traté en esta sección en mayo de 1978. La forma habitual de presentar la ilusión de Pulfrich consiste en hacer oscilar un péndulo dentro del campo visual del observador, uno de cuyos ojos está cubierto por un filtro opaco, mientras que el otro ojo se deja descubierto. En estas condiciones el péndulo aparenta oscilar describiendo no una línea recta, sino una elipse. Según la mayoría de las hipótesis acerca de la ilusión de Pulfrich, el filtro oscuro hace que la retina del ojo cubierto se retrase en la percepción de la señal visual; resultado de ello, el ojo descubierto ve el objeto que se mueve en su posición verdadera, mientras que el ojo tapado lo ve en la posición que ocupaba un momento antes. Entonces, el observador interpreta la escena considerando que el objeto se encuentra más próximo o más lejano a él de lo que está en realidad. Si el objeto se mueve desde el ojo cubierto hacia el descubierto, la convergencia mental de los rayos aparentes lo situará más lejos del observador de lo que está; si el movimiento se efectúa en el sentido opuesto, el objeto parecerá encontrarse más próximo.

La nieve de las pantallas de televisión no es en realidad un objeto en movimiento, pero manifiestamente puede resultar el mismo tipo de ilusión si se contempla la pantalla con un ojo cubierto por un filtro oscuro. Los primeros en estudiar este efecto fueron Christopher W. Tyler, del Instituto Smith-Kittlewell de Ciencias de la Visión, y John Ross, de la Universidad de Australia Occidental. Investigaciones recientes de Joseph J. Mezrich y Albert Rose, de Exxon Corporate Research Laboratories, en Linden, New Jersey, han aclarado más aspectos del mismo. No obstante todo ello, y al igual que ocurre con la mayoría de las demás ilusiones ópticas, seguimos sin saber muchos pormenores de ese efecto.

Supongamos que en la pantalla aparece un parásito. De acuerdo con una hipótesis vigente, si es el ojo izquierdo el que está cubierto por el filtro, el derecho percibirá el punto inmediatamente y el ojo izquierdo lo percibirá un instante después. Ahora supongamos que, en ese mismo momento, aparece un segundo punto desplazado ligeramente a la derecha del lugar que en un principio ocupaba el primero, que ya se desvaneció de la pantalla. Este segundo punto lo ve al instante el ojo derecho, mientras que el izquierdo está justamente entonces viendo el primero. En la realidad, esta situación la interpreta el sistema visual del observador haciendo que converjan los rayos luminosos procedentes de ambos puntos, por lo que en la pantalla parece haber un único punto hundido en ella. Lo mismo ocurriría si apareciese un tercer punto cuando el segundo se desvaneciese de la pantalla. Si la secuencia de puntos es adecuada, éstos aparentarán moverse hacia la derecha como un punto único hundido en la pantalla y la ilusión se repetirá una y otra vez. Aun cuando la configuración de puntos sea en realidad aleatoria, una secuencia adecuada dará la ilusión de un plano de puntos móviles hundido en la pantalla.

Podemos ver, de una manera parecida, los puntos como sobresaliendo de la pantalla y moviéndose hacia la izquierda si su secuencia es tal que cada uno aparezca ligeramente a la izquierda del precedente. El retraso perceptivo de uno de los ojos produce confusión, salvo que el observador crea que los rayos luminosos que le llegan de ambos puntos proceden de un solo punto ligeramente separado de la pantalla. De aquí que el ruido caótico de los puntos blancos de la pantalla se organice en planos que parecen encontrarse a profundidades diferentes y moverse en sentidos opuestos. Si el observador traslada el filtro al otro ojo, se invertirán los sentidos de los movimientos de los planos.

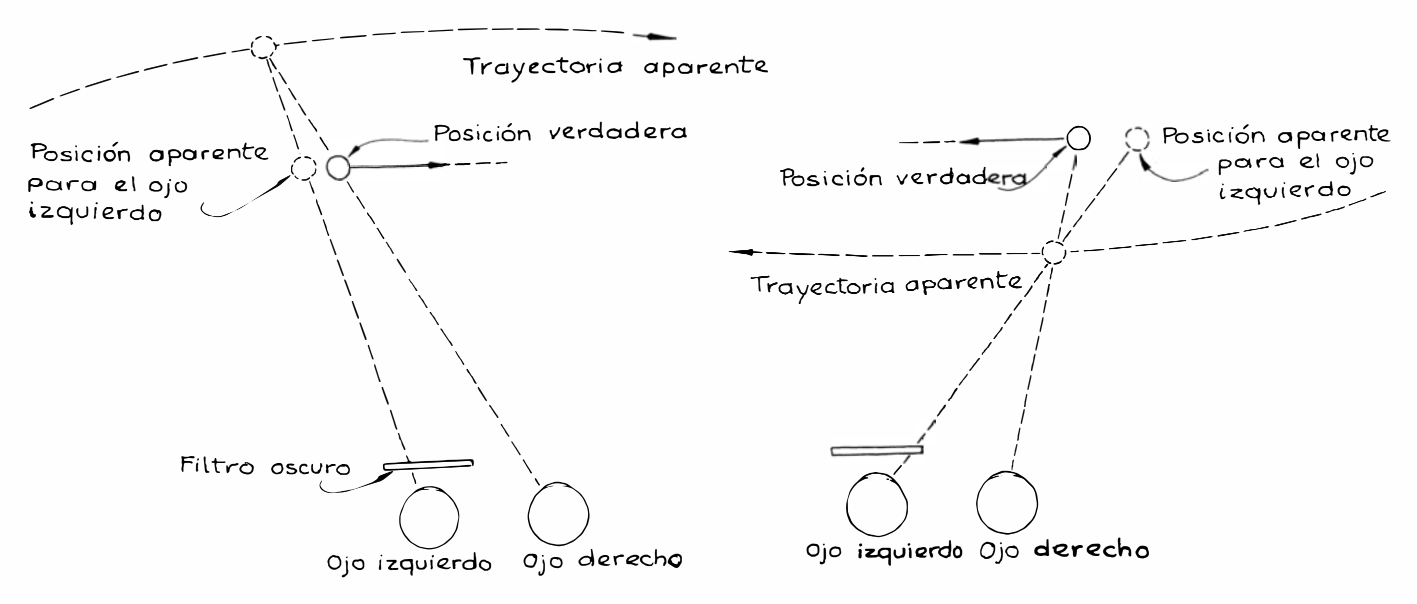


Profundidad y movimiento aparentes en la "nieve" de la televisión

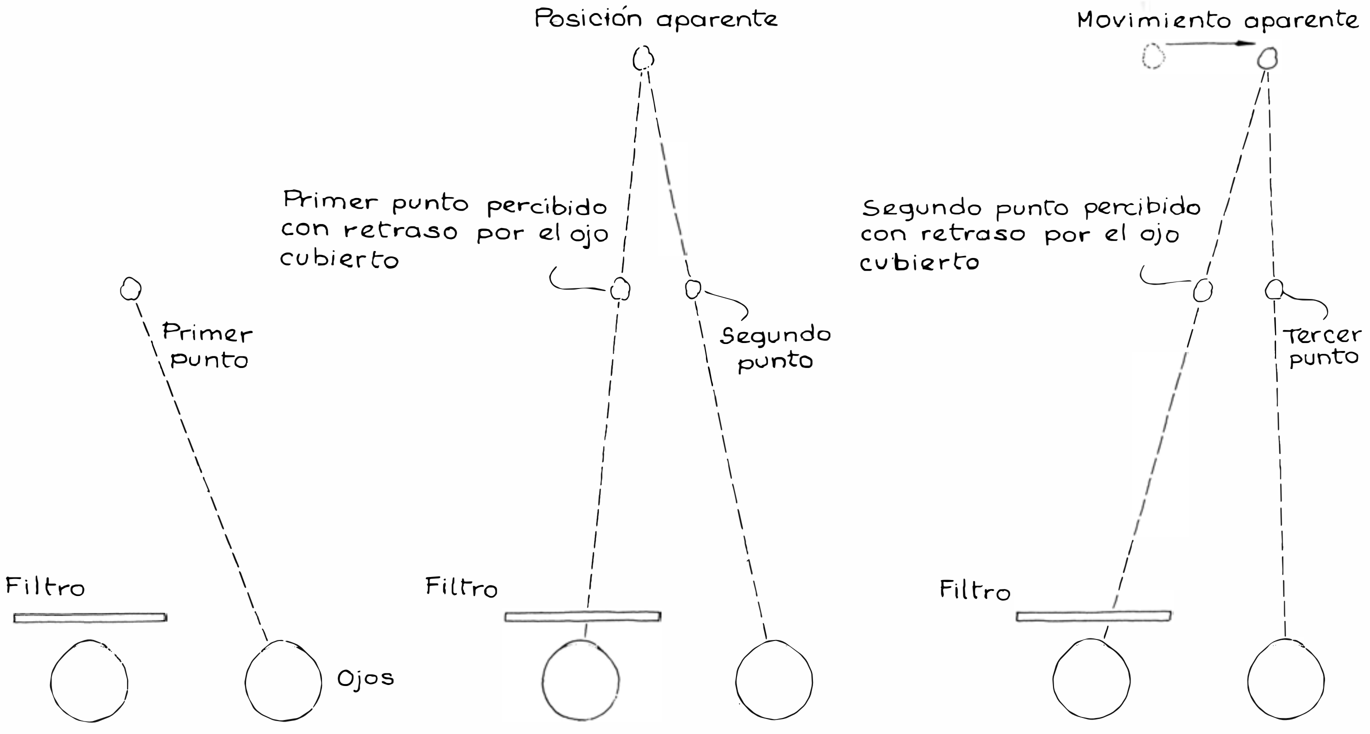
Mezrich y Rose han descubierto algunas características curiosas del movimiento aparente del ruido caótico. Al hacer variar en la pantalla la densidad de puntos parásitos, observaron que la velocidad aparente de los puntos en su movimiento a través de la pantalla resultaba afectada muy poco; sin embargo, por debajo de cierto umbral de densidad de puntos el efecto desaparecía. Para densidades algo superiores a la umbral sólo observaron un plano de puntos móviles hundido en la pantalla. Para ver los dos planos, los puntos debían hallarse en una densidad como la que se encuentra al sintonizar el televisor con un canal inactivo. (A veces, el aparato puede necesitar un ajuste normal de los mandos.) El hecho de que la velocidad aparente de los puntos fuese independiente de su densidad, con tal que ésta fuese superior a la umbral, proporcionó a Mezrich y Rose una de las claves para explicar la ilusión.

Además, la ilusión resultó depender del ángulo subtendido por la pantalla dentro del campo visual del observador. Cuando este ángulo disminuía a partir de un valor inicial elevado, aumentaba la densidad umbral de puntos. Todo parecía que, a medida que la imagen de parásitos se iba limitando progresivamente al centro de la fóvea (que es la depresión de la retina donde con mayor densidad se agrupan los fotorreceptores), se necesitaban mayores densidades de parásitos para proporcionar la ilusión de profundidad. Al reducir el ángulo de 30 minutos a 15, la densidad umbral de puntos necesaria para la ilusión saltó a un valor mucho más elevado. Al reducir aún más el ángulo, la ilusión desaparecía. Estos inesperados resultados proporcionaron otro indicio de mayor importancia acerca de la naturaleza de la ilusión.

¿Cómo se compaginan ambos indicios? La velocidad aparente de los pun-



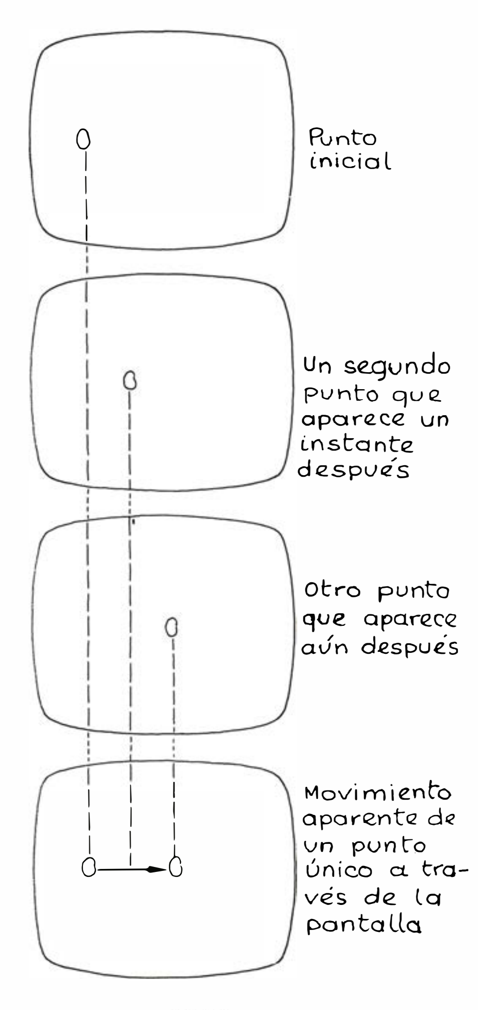
Ilusión de Pulfrich con un péndulo en oscilación



Ilusión de Pulfrich con el punteado de una pantalla de televisión

tos la fija el cociente de un ángulo característico (que el observador determina de alguna forma) dividido por un tiempo característico de gran interés para la observación. Es probable que este tiempo característico sea el tiempo que dura una fluctuación de intensidad en la pantalla, 1/60 de segundo. (En Estados Unidos la frecuencia de la red es de 60 cps; en otros países este tiempo característico será de 1/50 seg.) El ángulo característico ya no es tan fácil de adivinar, y habrá que considerar aquí dos factores.

El origen de uno de los factores se encuentra en las investigaciones realizadas acerca de la estereopsis en imágenes de punteado aleatorio. Habitualmente, en este tipo de experiencias el observador ve dos figuras simultáneamente, una con cada ojo. Cualquiera de las dos figuras contemplada por separado parece presentar una distribución de puntos puramente aleatoria, pero cuando ambas se miran a la vez y se fusionan, el observador percibe profundidad y estructura. Los experimentadores han encontrado que, para que se dé la sensación de profundidad, es necesario que los centros de la zona saliente y de la zona hundida estén separados un ángulo de ocho minutos como mínimo. Por consiguiente, las figuras fundidas mentalmente deben ocupar un ángulo de 15 minutos como mínimo en el campo visual del observador.



Efecto cascada

He aquí, pues, una cifra relacionada con el valor inferior del ángulo que debe ocupar una pantalla de televisión en el campo visual de un observador si se desea que los parásitos se organicen en planos situados a distintas profundidades. Como mínimo, la pantalla debe ocupar un ángulo de 15 minutos. Si ocupa más de 30 minutos, el observador podrá organizar los parásitos con bastante facilidad. Si ocupa entre 15 y 30 minutos, la organización será más difícil. Por eso, el umbral de la densidad de puntos ha de ser mayor a fin de asegurar la presencia de puntos en cantidad suficiente para conseguir zonas de hundimiento y de resalto separadas un ángulo de ocho minutos como mínimo.

Otro aspecto a considerar es que los puntos aparentan moverse suave y lentamente, cuando la realidad es que no se mueven en absoluto. ¿Por qué el observador percibe movimiento cuando lo único que ocurre en la pantalla es que fluctúa la intensidad luminosa? Ya hay investigaciones anteriores acerca de la ilusión de movimiento que se crea cuando los estímulos son consecutivos y están ligeramente separados. Esta ilusión la hemos experimentado todos cuando se hacen parpadear una tras otra las luces de una hilera, de forma que se tiene la impresión de que toda la hilera se mueve. Es el efecto que se observa en los reclamos exteriores de teatros y moteles.

Para que dos puntos consecutivos de una pantalla de televisión puedan percibirse como un único punto brillante que se mueve suavemente, los puntos han de estar separados un ángulo no superior a unos 15 minutos. Este movimiento suave, conocido por cascada o "movimiento fi", sólo puede verse cuando el flujo en un sentido es distinguible del flujo en el otro sentido. En ausencia de este discernimiento, el observador será incapaz de separar las fluctuaciones caóticas y percibir el efecto cascada. Con un filtro oscuro sobre un ojo se provoca tal discernimiento entre los sentidos del flujo en cascada, ya que aquél fuerza a los dos movimientos aparentes a separarse en dos planos situados a distintas profundidades.

Por tanto, la velocidad de los movimientos está determinada por las limitaciones angulares impuestas por la ilusión de cascada y la ilusión de profundidad; la velocidad está también regida por el tiempo mínimo de duración de las fluctuaciones. Las limitaciones angulares imponen que los puntos consecutivos estén separados un ángulo no superior a 15 minutos. La ilusión de profundidad impone que las zonas contiguas de resalto y hundimiento estén separadas un ángulo de ocho minutos como mínimo. Por eso, cuando un punto hundido y otro resaltado se cruzan entre sí, su separación inicial debe ser al menos de ocho minutos y, al cabo de 1/60 de segundo, su separación debe ser de ocho minutos como mínimo, e inferior a 15. Si dividimos este ángulo comprendido entre ocho minutos y 15 por el tiempo de 1/60 de segundo, resulta para los puntos una velocidad aparente que se sitúa entre ocho y 15 grados por segundo, lo que concuerda con las mediciones de Mezrich y Rose.

Investigaciones recientes de David S. Falk, de la Universidad de Maryland, y Robert Williams, de la Universidad de Bristol, sugieren que los puntos se organizan ulteriormente aún más después de haber sido asignados a uno de los planos. El observador empieza viendo que los puntos aparecen caóticamente en la pantalla del televisor. La visión monocular asigna velocidades a los movimientos de los puntos en cascada hacia la derecha y hacia la izquierda. La visión binocular, estando la respuesta de uno de los ojos retrasada por un filtro, asigna profundidad a los puntos de acuerdo con la ilusión de Pulfrich. En este punto, la velocidad y la profundidad deben mostrar todo un intervalo de valores.

Falk y Williams han sugerido que el observador organiza adicionalmente los puntos comparando las velocidades de diferentes grupos de éstos. Así, las manchas cuyas velocidades aparentes son pequeñas y que se encuentran relativamente separadas dan la impresión de moverse más despacio que el ruido de la pantalla. Por el contrario, las manchas cuyas velocidades aparentes son mayores y que se encuentran relativamente cercanas entre sí dan la impresión de moverse a mayor velocidad que el ruido de la pantalla. Por ello, Falk y Williams sostienen que el procesado visual que sigue a la asignación estereoscópica de la profundidad es responsable de la conformación del espectro de velocidades y profundidades bajo la forma de la ilusión de puntos situados en un solo plano, moviéndose todos ellos a una velocidad aproximadamente constante y uniforme. Hay uno de estos planos moviéndose en cada sentido derecho e izquierdo.

Un modelo alternativo al de Pulfrich es el de la "disparidad espacial aleatoria". Según esta hipótesis, los puntos se eligen por parejas al azar y los puntos de cada pareja se fusionan en uno solo, al que se asigna profundidad. La profundi-

dad mayor se asigna a las parejas de puntos que estén separados unos 15 minutos. A continuación, y sólo entonces, se asigna movimiento. Si la imagen de la pantalla fluctúa en 1/60 de segundo, la velocidad aparente de los puntos será de 15 grados por segundo. Nuevas experiencias determinarán si esta hipótesis explica la ilusión mejor que el modelo de Pulfrich u otro cualquiera.

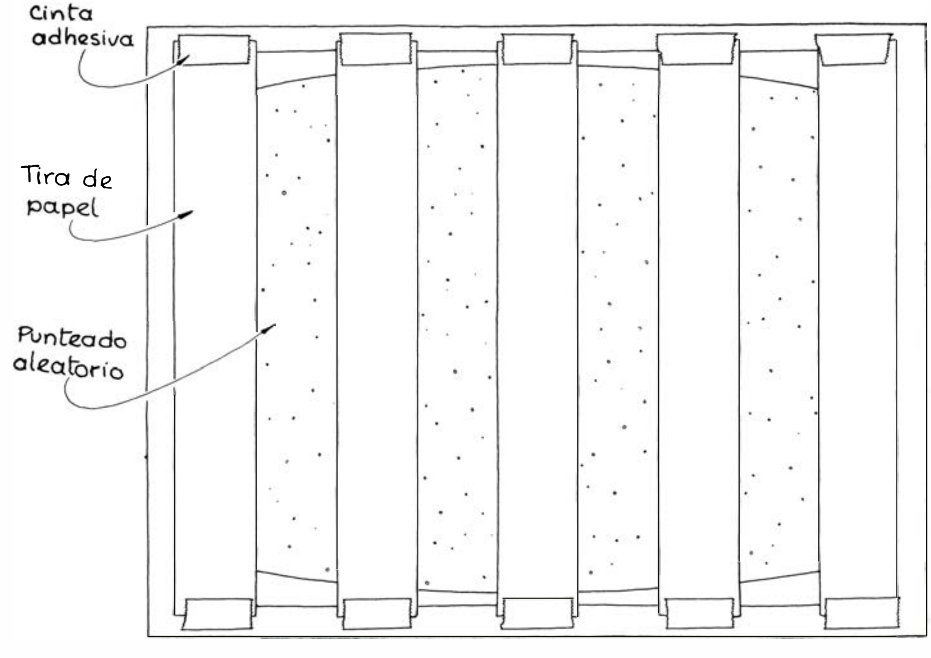
Yo mismo he repetido algunos experimentos de varios de los investigadores utilizando un par de filtros polarizadores cruzados que mantenía delante de un ojo mientras observaba la nieve de mi televisor en blanco y negro. Podía actuar sobre distintos factores. Así, podía modificar el brillo y el contraste de la pantalla y regular la transmisión a través de los filtros. Con ésta parcialmente permitida y los mandos de brillo y contraste cercanos a su posición normal, la ilusión de dos planos de puntos coherentes se hizo patente de inmediato. Influía poco o nada que suprimiese totalmente el brillo. La pantalla parecía entonces albergar una imagen plana de pulgones de agua resplandecientes deslizándose por el cristal, formando a veces, brevemente, figuras geométricas. Además, esta ilusión desaparecía cuando la transmisión a través de los filtros se reducía mucho, es decir, cuando los ejes de polarización de los filtros se encontraban casi perpendiculares. Por supuesto, sin los filtros la ilusión no se presentaba.

Observé una diferencia importante entre lo que vi y la ilusión descrita en los artículos publicados sobre el tema. Los puntos que yo observaba solían arremolinarse coherentemente; así, con los filtros delante del ojo izquierdo, el remolino se formaba a derechas, mientras que con los filtros delante del ojo derecho el remolino se formaba en sentido contrario. No acabo de comprender del todo el porqué de aquellos remolinos. Su aparición no dependía críticamente de los mandos del televisor y seguían apareciendo cuando sustituí los filtros polarizadores por celofán coloreado; de aquí que no dependan de la polarización de la luz.

Conjeturo que los remolinos son el resultado de mi propia organización del movimiento coherente, tras hacer una fusión estereoscópica de las pantallas captadas por ambos ojos. Este nivel de organización ulterior se encuentra dentro de las pautas que sugieren Falk y Williams. El efecto cascada visto monocularmente conduce a la ilusión de que los puntos se mueven. Y el mecanismo de la ilusión de Pulfrich me hizo asignar distancia a los puntos en movimiento. A continuación, interpreté además los puntos estrechando los límites de sus velocidades aparentes, pero organizando adicionalmente las manchas móviles en forma de remolino. Por ejemplo, con los filtros delante del ojo izquierdo, en la parte superior de la pantalla predominaban las manchas que se desplazaban hacia la derecha y en la parte inferior las que se desplazaban hacia la izquierda. El efecto resultante era que se veía un remolino que giraba en el sentido de las agujas del reloj. Esta ilusión era tan convincente que cuando me concentré en un solo plano de puntos, estos parecían arremolinarse también.

Observé otros dos efectos más. Con los filtros colocados cerré los ojos alternadamente de forma que viese la pantalla monocularmente y sin fusión estereoscópica. Con el ojo descubierto veía una distribución de puntos caótica, como cabía esperar y es normal ver en la nieve de la televisión cuando el observador la contempla binocularmente. Con el ojo cubierto veía una pantalla menos iluminada y, por tanto, no apreciaba ningún punteado aleatorio, sino ondas que avanzaban al azar mientras el punteado caótico se organizaba en cascadas. Este mismo tipo de cascada puede verse, si se contempla la pantalla sin filtros, cuando reducimos la intensidad.

Separación angular necesaria para la ilusión de profundidad



Cómo conseguir franjas de punteado caótico en la pantalla

El segundo efecto que observé es similar a uno que les describí el mes pasado. Al contemplar monocularmente una pantalla de nieve, el centro del campo visual parece bullir en un frenesí de actividad, mientras que la zona circundante está relativamente en calma. Utilizando los filtros, observé en la pantalla la misma zona hiperactiva mirando monocularmente tanto con el ojo cubierto como con el descubierto. Al mirar con ambos ojos a la vez y distinguir planos de puntos moviéndose hacia la derecha o hacia la izquierda, la zona hiperactiva desaparecía. Sin embargo, cuando los puntos se separaban en remolinos, parecían dar vueltas en la zona hiperactiva. Esta impresión la verifiqué pasando rápidamente de visión monocular (cerrando un ojo y acotando la zona hiperactiva) a binocular (con el arremolinamiento presente).

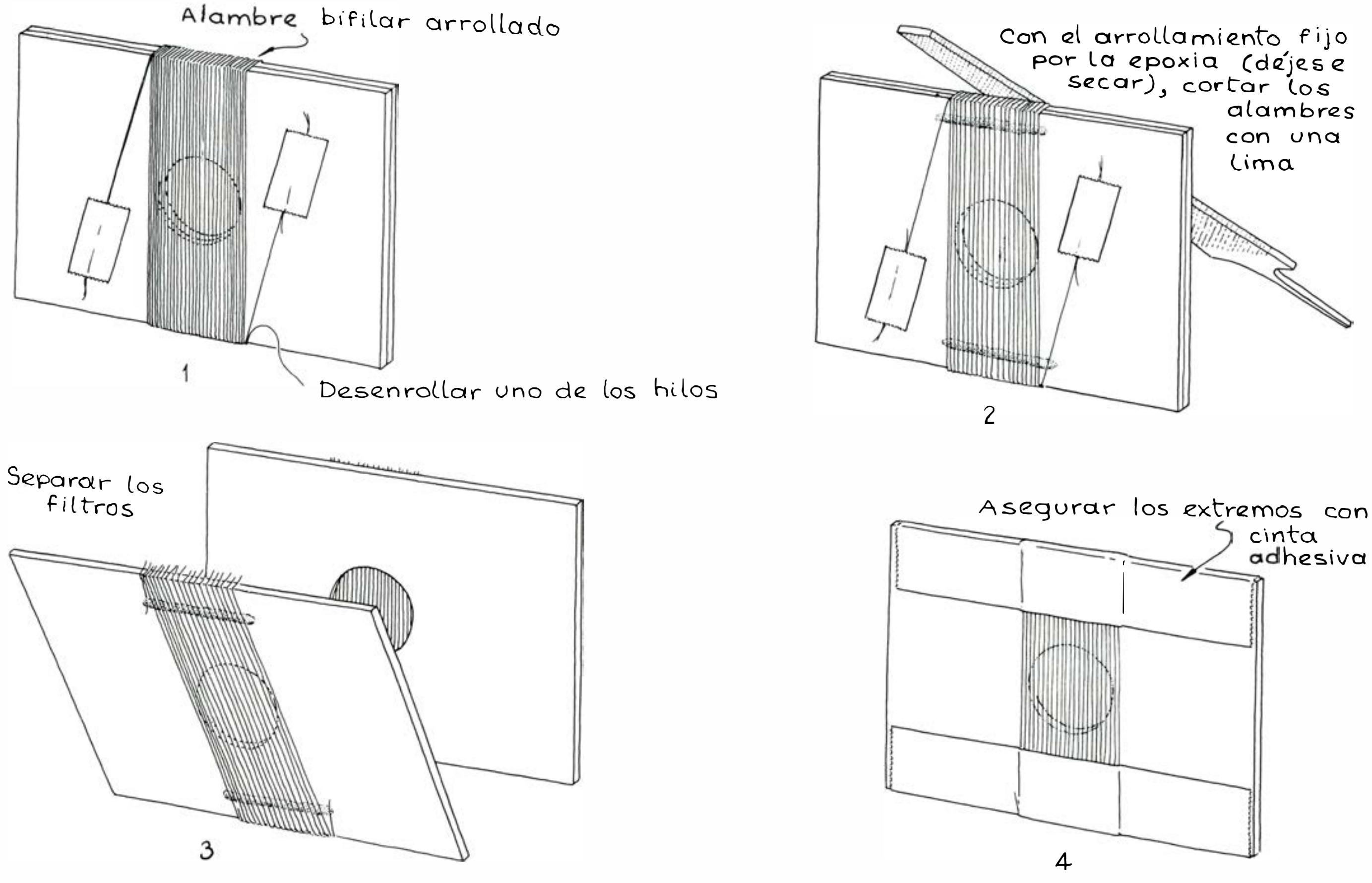
Mezrich y Rose han llevado a cabo otro experimento que yo he repetido en una versión ligeramente distinta. Dicho experimento consistió en separar el punteado caótico en franjas punteadas y franjas en blanco verticales. Tales franjas eran siempre de la misma anchura, y los experimentadores consiguieron ajustar su número. Cuando las franjas eran relativamente anchas, de forma que en la pantalla había pocas, la ilusión de puntos que se movían coherentemente en planos se desarrollaba independientemente en cada franja. Con franjas estrechas, y por tanto con mayor número de las mismas, el movimiento coherente podía verse a través de todas ellas.

La transición entre ambos efectos tenía lugar cuando la frecuencia de franjas se hallaba entre uno y dos ciclos por grado del campo visual. (Un ciclo se compone de una franja punteada y una franja en blanco.) Cuando la frecuencia de franjas era de un ciclo por grado, las manchas de puntos hundidos y salientes estaban suficientemente separadas para que pudiese verse la ilusión de profundidad de Pulfrich. (Recuérdese que la separación debe ser un ángulo de ocho minutos como mínimo.) A la frecuencia de un ciclo por grado, la anchura de una franja punteada es 30 minutos, por lo que las manchas pueden estar suficientemente separadas y el observador podrá ver la ilusión de profundidad y movimiento coherente dentro de la franja.

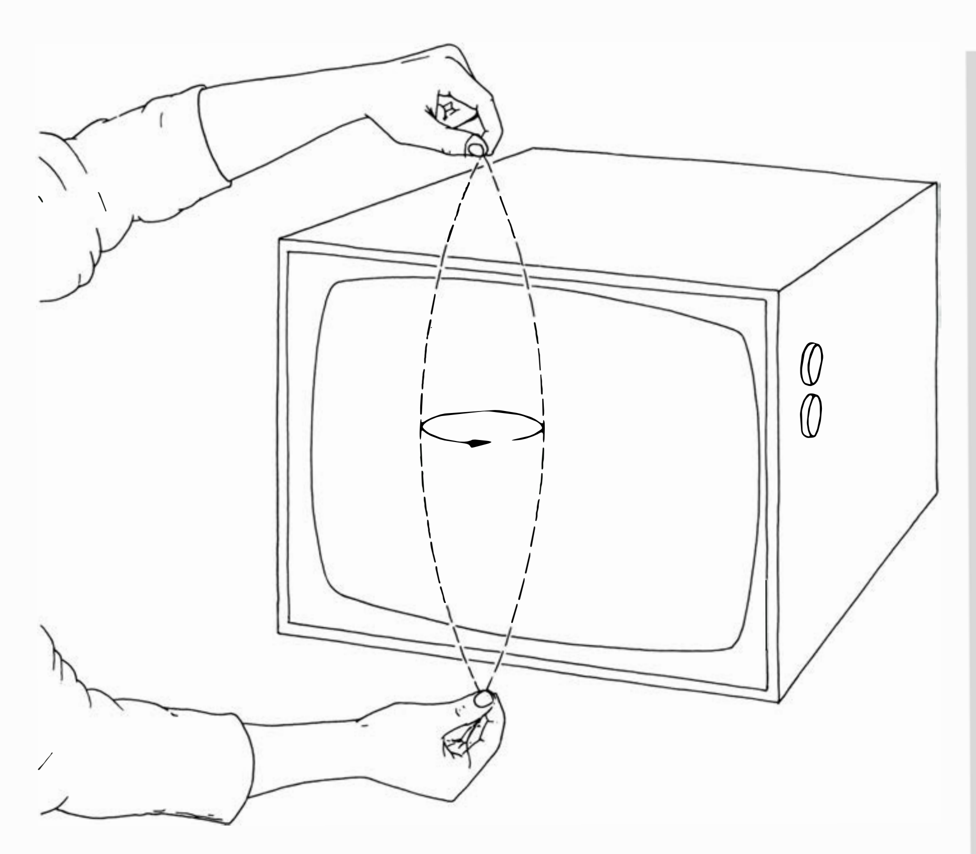
A la frecuencia de dos ciclos por grado, la anchura de las franjas punteadas es sólo 15 minutos. Es menos probable que las manchas muestren entonces la separación necesaria, por lo que la ilusión de profundidad y movimiento coherente resulta también menos probable. Por el contrario, las franjas punteadas estarán suficientemente próximas para que la separación necesaria se dé entre franjas contiguas y la ilusión de profundidad y de movimiento coherente aparecerá, pero se hará patente a través de todas las franjas antes que en cada una de ellas individualmente.

Estos mismos resultados los he podido conseguir pegando tiras de papel verticales a la pantalla de mi televisor. Si bien utilicé tiras de diferentes anchuras, en cada ensayo la anchura de las tiras fue siempre la misma e igual a la de las porciones de pantalla que dejé al descubierto. En todos los experimentos traté de colocar la cabeza exactamente en la misma posición que antes para que la pantalla ocupase siempre el mismo ángulo de visión. La transición de movimiento coherente en cada franja por separado a movimiento coherente a través de todas las franjas se presentaba aproximadamente a la misma frecuencia de franjas que encontraron Mezrich y Rose.

Dwight M. Brown, Jr., de Shreveport, Louisiana, me envió no hace mucho un conjunto de observaciones completamente diferentes realizadas sobre un televisor. Brown ha observado que, al mover un peine o una rejilla que sostenía delante del aparato, lograba a veces que la imagen de la pantalla pare-



Construcción de un filtro de Ronchi



Ilusiones producidas con una cuerda en rotación

ciera moverse. Esta ilusión podría resultar de un efecto muaré entre un espaciado periódico de la imagen y el espaciado periódico del peine o de la rejilla.

La rejilla utilizada por Brown es un filtro de Ronchi que construyó a partir de dos trozos de placa de aluminio delgada y un poco de alambre bifilar (de dos hilos) de 0,23 milímetros. Tras practicar un orificio de unos 3 centímetros en cada placa, arrolló el alambre alrededor. Con ello, ambos lados del orificio quedaron cubiertos de alambre. La parte de éste en contacto con el metal la fijó con epoxia y cortó el alambre con una lima para separar los dos trozos de metal. Seguidamente retiró un alambre sí y otro no y colocó cinta adhesiva sobre los extremos cortados del alambre restante.

Brown ha experimentado también con los efectos estroboscópicos asociados a las pantallas de televisión. Probablemente el lector ya habrá observado que un objeto que gire muy rápido delante de una pantalla en funcionamiento puede crear un efecto de este tipo. Observé hace años que una peonza plana que bailase delante de un receptor de televisión daba la impresión de mantenerse estacionaria, o incluso girar en sentido contrario al verdadero. En un televisor, la imagen la crea el haz de electrones que por el interior del tubo de imagen barre éste de izquierda a derecha, raya a raya, hasta alcanzar su base. Y ello explica que la intensidad de la pantalla fluctúe periódicamente.

Supongamos que delante de la pantalla se pone a bailar una peonza dotada de un dibujo a rayas en su superficie superior. Si gira en coincidencia con la variación de las fluctuaciones de intensidad de la pantalla, su superficie superior se iluminará cada vez que el dibujo tenga la misma orientación. Entonces, salvo que esta iluminación se difumine en la luz de la habitación, un observador verá constantemente el dibujo con la misma orientación y la peonza parecerá estacionaria. Si la rotación de la peonza es ligeramente más rápida que la cadencia a la que es iluminada por la pantalla, el dibujo parecerá girar lentamente en el mismo sentido que la peonza. Si la rotación de la peonza es ligeramente inferior a la cadencia de iluminación, el dibujo se iluminará cada vez bajo una orientación levemente anterior a la que tenía en la iluminación precedente y, en consecuencia, parecerá girar en sentido contrario al de la peonza.

Brown ha podido conseguir un efecto estroboscópico empleando el barrido lineal de la pantalla de una manera bastante más sencilla. Para ello, hizo balancear en círculo una cuerda por delante de la pantalla. Al mirar la pantalla a través de la cuerda, observó unas rayas oscuras que la cruzaban, mientras la cuerda saltaba de una posición a otra.

Libros

Tratado de antropología biológica, psicología fisiológica y poder curativo de la vitamina C

Tito A. Varela, Silverio Palafox y Cristóbal Mezquita

INTRODUCCION A LA ANTROPOLOGIA, por Arturo Valls. Editorial Labor. Barcelona 1980. La antropología es en la actualidad un término profusamente manejado, hasta el punto de que la problemática y significado del mismo quedan difuminados en su amplia y variada utilización. Este fenómeno viene determinado, esencialmente, por su significado etimológico y, también, por la complejidad que genera la interacción de los dos grandes fenómenos de la naturaleza humana, el fenómeno biológico y el fenómeno cultural. Sin embargo, es posible la individualización del primer fenómeno y su sometimiento a una metodología experimental, que nos conduce a una especialidad concreta y objetiva como es la antropología biológica, cuyos resultados y planteamientos quedan claramente enmarcados en las ciencias experimentales. Las otras áreas interdisciplinarias con la antropología biológica, cuyo objetivo es también el conocimiento del hombre, pero en sus ámbitos cultural y filosófico, presentan una temática formal de difícil delimitación; de ahí, las múltiples y controvertidas clasificaciones de las mismas. La antropología biológica es una disciplina experimental, dentro del campo de la biología, cuyo objetivo primordial es el estudio de las características biológicas del hombre. Todavía un objetivo tan amplio no es, ni con mucho, ilustrativo del contenido de esta disciplina; para ello es necesario una exposición de las diferentes materias que engloba, así como la problemática de las mismas.

El hombre, como entidad biológica, puede analizarse en el pasado y en el presente. Cuando lo que pretendemos es el estudio de la evolución humana o proceso de hominización, desde que comenzó a bifurcarse de sus parientes más próximos, los Póngidos, se origina una rama de la antropología biológica denominada paleoantropología. Si lo que pretendemos es el análisis del hombre actual en sus diferentes vertientes, se originan distintas especialidades; entre ellas, cabe citar la genética humana, la biodemografía, la somatología, la antropología molecular, la raciología, etcétera. Dichas especialidades forman el contexto básico del contenido y clasificación actual de la antropología biológica. Conviene precisar que en estas materias lo que se analiza es la variabilidad humana, bien sea a un nivel u otro, dentro del campo de posibilidades actuales del desarrollo de las técnicas de experimentación antropológica. En este sentido, la antropología biológica se diferencia de la medicina, con la cual, en principio, podría existir solapamiento, en que esta última analiza la variabilidad patológica, mientras que la antropología biológica estudia la variabilidad normal; es decir, cuando examinamos, por ejemplo, el sistema Rh, no valoramos, aunque se estudien, los procesos de isoinmunización feto-materna, ni el fenómeno de aglutinación postransfusional; pero sí estudiamos los distintos valores que presentan las frecuencias de los antígenos o grupos sanguíneos del sistema Rh en la población, así como la comparación con otras poblaciones y la dinámica de las mismas. En realidad, las comparaciones se efectúan a nivel de frecuencias génicas y no con las frecuencias de los fenotipos.

Todas estas aclaraciones son, en cierta medida, necesarias a la hora de comentar el tratado del profesor Arturo Valls "Introducción a la Antropología". Huelga decir que las citadas aclaraciones no van dirigidas a los especialistas de esa disciplina. En este sentido, hay que señalar que el autor comienza en su obra por indicar que dicha monografía va destinada, sobre todo, a los estudiantes de biología, si bien puede resultar de utilidad para quienes se dediquen a campos de investigación fronterizos de la antropología biológica.

En los dos primeros capítulos de la obra se exponen la definición y evolución histórica del concepto de antropología, haciendo especial hincapié en las dos grandes vertientes del enfoque antropológico: el cultural y el biológico. Al objeto de comprender, no sólo el fenómeno humano, sino cualquier otro de índole biológica, es condición imprescindible el conocimiento de lo que es y significa la evolución; por este motivo se dedica, en esta obra, un capítulo al estudio del fenómeno evolutivo. La evolución es una característica inherente a todo ser vivo. Cualquier entidad biológica está sujeta al proceso de la evolución; por ende, el conocimiento de la organización vital tiene que pasar por el tamiz, previo, de la comprensión del mecanismo evolutivo.

Tomando como base un criterio de estructuración racional para el conocimiento del hombre, es imprescindible su ubicación en la escala zoológica animal, aspecto que se analiza en los apartados dedicados a los Primates, así como en la anagénesis de los mismos, la cual nos va a situar en el punto crucial para la evolución humana: el de la bifurcación de Póngidos y Homínidos. A partir de aquí se va a desencadenar una rápida y complejísima transformación evolutiva que se denomina proceso de hominización, el cual culminará con la aparición del *Homo sapiens*. El análisis de este proceso da nombre a una rama de la antropología biológica, citada más arriba: la "paleoantropología". Este apartado se analiza, en el presente trabajo, de una forma minuciosa, y es, quizás, una de las secciones más elaboradas de la monografía. Conviene destacar que la ubicación de la paleoantropología, al comienzo de la temática del texto, no es muy habitual en los tratados de antropología biológica. Sin embargo, existen razones objetivas para su inclusión al principio, habida cuenta de que, para la comprensión de lo actual, es necesario el conocimiento del pasado.

Comienza la paleoantropología con una descripción del estadio Australopithecus, de sus aspectos morfológicos, taxonómicos y filogenéticos, así como una revisión crítica acerca de la problemática taxonómica y filogenética. Nadie duda,

entre la comunidad científica, que a partir de los Póngidos se va a originar el hombre actual; lo que no está tan claro es cómo se produce ese fenómeno. La interpretación filogenética es el caballo de batalla de la paleoantropología, la cual, a su vez, está íntimamente relacionada con la taxonomía. Es decir, una concepción taxonómica incorrecta conduce necesariamente a una interpretación filogenética falsa. En sus inicios, la taxonomía paleoantropológica mostraba una excesiva proliferación de taxones; en la actualidad, los criterios que se consideran a la hora de establecer un taxón son más elaborados y, sobre todo, se subraya la relativa validez del método cuando se desconocen aspectos como la variabilidad general, dimorfismo sexual, etcétera. Todo lo cual redunda en un mayor acierto filogenético. Sin embargo, y como ya hemos señalado, no existen modelos filogenéticos aceptados de forma unánime.

En los restantes capítulos, bajo criterios similares, se expone la problemática de los estadios evolutivos subsiguientes a los Australopithecus, siendo válidas las consideraciones antes mencionadas.

En la parte cuarta del libro se contempla uno de los apartados clásicos del contenido de la antropología, denominado por el autor "antropología morfológica", aunque también es corriente el empleo del término "somatología". El contenido de esta materia es muy extenso, dado que en la misma se analizan todos los caracteres morfológicos del individuo que posean variabilidad. Esta especialidad antropológica ha sido ampliamente estudiada, aunque hoy el ritmo de investigación ha disminuido debido al largo y complejo proceso ontogenético de los caracteres que engloba y, sobre todo, al descubrimiento de otros niveles más finos de enfoque de la variabilidad humana. Otro aspecto que resta interés a los caracteres morfológicos es la elevada influencia del ambiente en la fenogénesis de los mismos. Pero no cabe la menor duda de que la variabilidad morfológica representa un capítulo importante en el conocimiento de la variabilidad general del fenómeno humano.

El análisis de la variabilidad del individuo a nivel molecular origina una nueva especialidad denominada antropología molecular, que expone el autor en los capítulos siguientes. Dentro de esta especialidad, cabe señalar tres grandes áreas de estudio: la que hace referencia a los antígenos eritrocitarios o grupos sanguíneos, la que trata de las diferentes proteínas plasmáticas y la que analiza el polimorfismo y variabilidad de la isoenzima. Todas estas áreas de estudio determinan, en mayor o menor grado, una serie de polimorfismos cuya importancia antropológica y genética ha ido aumentando en los últimos años, hasta el punto de que los presupuestos dedicados a la valoración de polimorfismos serológicos, en poblaciones humanas, comprenden uno de los capítulos de mayor volumen de gastos de la investigación científica en el campo de la biología aplicada.

El primer apartado, tema en que el autor es especialista, hace referencia al estudio de los grupos sanguíneos y se expone, con mucho detalle, la amplia problemática que presentan los mismos. En este sentido se hace mención de las implicaciones evolutivas, genéticas, médicas y antropológicas de los sistemas serológicos. También describe, con cierta minuciosidad y haciendo especial mención del interés poblacional, las proteínas plasmáticas y los isoenzimas. El polimorfismo de estos últimos ha adquirido capital importancia, sobre todo, a partir del descubrimiento de los nuevos métodos de fenotipación electroforética (isoelectroenfoque), que entraron en escena a partir de los años setenta.

La comparación de los resultados obtenidos a través de los niveles de estudio morfológico y molecular ponen de manifiesto una importante falta de correlación, cuya causa, a la luz de los conocimientos actuales, no ha podido desvelarse, planteándose una serie de interrogantes que en cierta medida van a representar las referencias sobre las que se centrarán la mayoría de las investigaciones antropológicas. Pero ese capítulo queda fuera de los planteamientos generales de esta monografía.

Finalmente, y como es habitual en los tratados de antropología biológica, se analiza la variabilidad actual de las diferentes poblaciones humanas. Este aspecto da lugar a una nueva especialidad de la antropología biológica, conocida por heterografía o raciología, tema que aborda el autor detallando las múltiples concepciones taxonómicas existentes sobre la misma.

Dentro de las diferentes entidades de población, señala, según es norma, las características morfológicas que tipifican a las mismas, aunque incorpora los resultados de los polimorfismos serológicos e isoenzimáticos. El hecho de añadir estos nuevos caracteres en el contexto general de las diferentes poblaciones enriquece, indudablemente, el bagaje de las mismas, y, en consecuencia, permite un mayor grado de precisión en el establecimiento de las afinidades y diferencias entre ellas. Hay que tener presente, sin embargo, que muchos de estos caracteres o polimorfismos no son selectivamente neutrales, lo cual hace disminuir su importancia taxonómica.

En resumen, se trata de una obra con una exposición clara y un amplio sentido crítico de evidente interés para los que se inicien en el campo de la antropología biológica y que, además, viene a llenar un vacío existente en la bibliografía castellana sobre el tema, desde la publicación, ya lejana, de la obra de Juan Comas "Manual de Antropología Física". (T. V.)

PSICOLOGÍA FISIOLÓGICA. Prólogo e Introducciones de Richard F. Thompson, de la Universidad de California en Irvine. Traducción española con revisión técnica del profesor Vicente Pelechano. H. Blume Ediciones; Madrid, 1979. Hace diez años que Blume inició con LA CELULA VIVA estas versiones españolas de algunas Selecciones del SCIENTIFIC AMERICAN; la que está reseñada aquí hace, si no me confundo, la número quince, y no es la última de las anunciadas. Leer en buen castellano lo que por obligación profesional se consultó tantas veces, e incluso –como es mi caso– ver algún estudio concreto que, en la última "memoria" para aspirar a cátedra de igual denominación que este volumen, proponía como modelo de apoyo didáctico entre la bibliografía más adecuada para cada tema concreto, es una satisfacción no sólo personal sino de consuelo común frente al desamparo bibliográfico específico que en nuestro idioma padecemos al respecto, grave sin disimulo posible, aunque estén ya en marcha gestiones y actividades encaminadas a remediarlo de un modo digno lo antes posible. Vaya, pues, por delante, el aplauso a la oportunidad, que bien merecería verse completada con lo que al final convendrá recoger respecto a una pertinente y nada difícil complementación actualizadora. Aumentan las razones para este encomio al comprobar el enorme influjo y la pasmosa vigencia que no pocos de los trabajos aquí incluidos tuvieron y mantienen, pese a la siempre temible fugacidad que amenaza a estas síntesis del estado de la investigación sobre un punto determinado en una fecha dada, aunque se acierte en el momento y el autor que son especialmente idóneos para realizarlo.

La *Psicología fisiológica* va perfilando un cierto dintorno cada vez más universalmente aceptado, y a ello han contribuido no poco, entre otros muchos, los autores de las investigaciones que aquí

se reproducen –y que en su día merecieron aparecer en una de las más acreditadas publicaciones científicas de alto nivel, dentro de un polifacetismo casi ilimitado–, así como también el propio presentador, profesor Richard F. Thompson, autor del prólogo y de las introducciones a cada sección de artículos afines, y es de suponer que igualmente lo sea de la selección y ordenamiento de estos mismos. (No debe confundir el lector al autor citado con el del mismo apellido, pero de nombre William R., copartícipe en uno de los trabajos seleccionados). El profesor Richard F. Thompson, presentador de esta selecta antología, es autor –aparte trabajos de investigación y otras colaboraciones con renombrados psicólogos– de unos *Fundamentos de psicología fisiológica*, bastante bien traducidos en México, y justamente afamados, pese a que, además de su fecha ya remota, internamente no logró hacer un libro bien proporcionado. Su otra obra afín, más reciente, *Introducción a la psicología fisiológica*, didácticamente más equilibrada, ha sido infortunadamente mal traducida, también en México. Ya el conocido S. P. Grossmann intentó algo similar con su *Essentials of physiological psychology* –que incomprensiblemente pasan los años sin que los traduzcan (como, a su vez, pasa con el no menos acertado librito de Birbaumer, en alemán)– respecto a su primitivo *Textbook*, todavía encomiable –aunque todos ellos pecan de exclusivismo neurofisiológico–, pese al vertiginoso envejecimiento que en diversos flancos sufren inevitablemente este tipo de publicaciones. Quizás entre los autores de textos recientes sea Marvin Schwartz quien más se ha acercado a lo que esta asignatura debe ser para el estudiante de psicología, orientando así la segunda edición de su texto, que esperamos tener la suerte de ver pronto correctamente vertido al español.

La que aquí se reseña es, como todas sus análogas, una armoniosa antología de artículos especialmente afortunados, que en la fecha indicada en todos ellos, aparecieron en el número correspondiente de SCIENTIFIC AMERICAN, y luego merecieron pasar al volumen que por encargo de los editores de dicha revista confeccionó y prologó R. F. Thompson, para ofrecerlo a quienes nos interesamos por estas cuestiones. Once son los apartados o secciones en que se recogen diversos temas englobables bajo la rotulación más o menos afín, con un total de cincuenta y ocho artículos, lo que rebasa algo al original, por la adición que más adelante se señala, especial para esta edición española:

I. En *Genética y Evolución humana*, temática de la primera sección –a la que precede un brevísimo prólogo meramente presentador, del ya citado Thompson–, Dobzhansky, siempre sugeridor, Washburn y Howells exponen síntesis lúcidas sobre cómo la genética, que en un primer momento pareció a no pocos un serio obstáculo para la teoría evolucionista, apoya hoy posibles explicaciones tanto de la primera evolución humana cuanto de su relativamente reciente diversificación racial, y de las perdurables direcciones evolutivas que nos es posible detectar en los hombres actuales.

II. El inagotable problema de *lo nativo y su cultivo*, extremoso y falseado cuando algunos se empecinan en presentarlo dilemáticamente, en vez de como la unidad resultante de interacción biunívoca, es aquí abordado en una selección temática que va desde lo predominantemente instintivo a lo incipientemente afectivo, pasando por lo que modula lo perceptivo. Lorenz, W. R. Thompson con Melzack, Lehrman, Fantz y Harlow, son los autores de los cinco artículos que sobre esos temas incluye esta sección.

III. *El cerebro como sustrato inmediato de nuestro conocimiento* tampoco es tema de hoy ni dejará de serlo mañana. Y aunque todos los trabajos recogidos en este apartado sean ya históricos por su fecha, lo son en el mejor sentido de la expresión, al haber plasmado síntesis magistrales en su momento: sobre el córtex (Gray), sobre la formación reticulada (French), sobre las ondas que registran la actividad cerebral (Brazier) y sobre la duplicidad hemisférica (Gazzaniga). El lector de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA puede –y debe– compararlos con el reciente número 38 que dedicó al cerebro, con lo cual se obtiene de forma directa una utilísima idea de los avances logrados durante los años setenta.

IV. Otro tanto cabría decir sobre cinco de los siete artículos con que aquí se exponen temas que van desde la *recepción de estímulos* a su *transmisión*, y el cierre del circuito con la *actividad* eferente. De pluriautoría el primero sobre receptores, síguenle dos primorosos trabajos de Katz y uno celebérrimo de Keynes, todos ellos sobre el impulso nervioso, que se coronan con otro no menos clásico del propio Eccles sobre la sinapsis. Su relativa vetustez nada merma a su valor y está compensada por dos estudios finales más recientes: uno de Heimer sobre rutas cerebrales y otro de Kandel sobre neuronas y comportamiento.

V. En esta antología de artículos señeros no podía faltar una sección dedicada al *nivel bioquímico* de los entresijos psicobiológicos. Se incluyen aquí cinco trabajos neuro-crino-moleculares y dos de psicodrogas. Abre la serie uno de Zuckerman sobre hormonas en general –descripción "clásica"–, seguido del de Guillermin y Burghs sobre factores hipotalámicos –igualmente de corte "clásico"–; tras él va uno de Fisher sobre estimulación química del cerebro, que se completa con el de Axelrod sobre neurotransmisores –muy didáctico y "clásico" también–, así como el de Levine sobre estrés y comportamiento. A continuación Grinspoon expone aspectos psicofarmacotóxicos de la mariguana y se cierra todo con una pluriautorial sinopsis de las drogas alucinógenas.

VI. Los artículos que forman este apartado abordan temas relativos al *control cerebral de la motricidad*, y ha sido acertadamente incrementado su contenido en la edición española. Así, a los de la original: uno de Kimura sobre asimetría cerebral, otro de Lippold sobre neurofisiología del temblor y un tercero de Evarts, muy interesante, sobre experimentos motores en animales vivos cerebralmente instrumentados, se ha añadido uno ulterior de Llinar sobre corteza cerebelosa, realmente bueno en el desarrollo de su contenido y espléndido en alguna de sus ilustraciones.

VII. Cómo construimos "nuestra realidad" –humana y personalmente– a través de *nuestras sensopercepciones* –humanamente individualizadas– conlleva otro clásico manojo de cuestiones neurofisiológicas, sobre las cuales se han reproducido aquí los siguientes estudios: uno de Melzack sobre percepciones dolorosas, otro de von Bekesy sobre el oído y la audición; tres sobre la visión (Michael: las imágenes retinianas; Hubel: el córtex visual; Noton y Stark: movimientos oculares y percepción visual). Se cierra la sección con un estudio de Held acerca del efecto de reaferencias en la adaptabilidad perceptual sensomotriz.

VIII. Sobre los dinamismos que impelen a la acción: *impulso, motivación, emoción* –en cuyo discernimiento antropo-zoético no afina nada la introducción de Thompson– se incluyen aquí los siguientes estudios: Holt y von Saint-Paul, "Control eléctrico de la conducta"; Olds, "Centros de placer en el cerebro"; Butler, "La curiosidad de los monos"; Hess, "Actitudes y tamaño de la pupila"; H. F. y M. K. Harlow, "Privación social en monos"; Weiss, "Factores fisiológicos

de la tensión y la enfermedad". Con una introducción más fina y arriesgada, F. R. Thompson hubiera podido mostrar la interconexión básica de todo ello, evitando así a no pocos lectores la impresión de ser bastante conflictiva. Esto, que aquí destaca más, puede extenderse a las otras introducciones –incluido el prólogo como ya se advirtió–, pues todas pecan de ser un mero sumario redactado del contenido, al que no añade nada Thompson, ni expone juicio crítico alguno.

IX. Sobre *dormir, soñar, despertar y atender,* versan sendos estudios de Jouvet, Keitman, Hall, Berlyne y Heron, que componen el ramillete seleccionado para esta sección nona. Nombres clásicos, en planteamientos que no lo son menos, de problemas que asimismo lo fueron, lo son y lo serán. Se vuelve a echar mucho de menos un pequeño esfuerzo por parte del presentador para haberlo hecho con una introducción sinóptica más jugosa, como tentadoramente lo pedía y se prestaba a ello el tema.

X. Se asciende ya aquí *al aprendizaje y la memoria,* tanto en sus bases posibilitantes como en sus reverberantes consecuencias autopotenciadoras. Desde el nivel vegetativo, a cargo de Di Cara, se pasa al planteamiento general, con un trabajo ya añejo de Gerard sobre la memoria; a su abordaje molecular clásico por Agranoff en peces, y el replanteamiento de su neurofisiología por el ritornelante Pribram, siempre inspirado e inspirador. Cierra el conjunto un estudio multiautorial cuyo título lo dice todo: "Cambios en el cerebro como consecuencia de la experiencia". Excelente elenco éste de testimonios heurísticos, pese al implacable tiempo transcurrido.

XI. Se cierra el libro con cinco trabajos acerca de lo que ha dado en llamarse *procesos cerebrales superiores o complejos,* que requieren en parte otra mentalidad para atinar el de los diseños experimentales adecuados. Los Harlow vuelven con "Aprendiendo a pensar"; de Luria se recoge "La organización funcional del cerebro"; de Hockett "El origen del lenguaje"; de Broadbent "Atención y percepción del lenguaje"; y de Geschwind "El lenguaje y el cerebro". Exposiciones muy concisas, de temática y autoría que no admiten intento de resaltar brevemente su evidente relevancia sin caer en tópicos y pedanterías.

Algunas peculiaridades del original –no atribuibles, por tanto, a la edición española– se han indicado al hilo del desentrañamiento de su contenido, y no vuelvo sobre ellas. Pero en la misma línea está, sin duda, otro criterio de origen, aparentemente muy honesto y en realidad más que discutible. Es el relativo a no incluir, en lo posible, el mismo o los mismos artículos en volúmenes antológicos de diverso título. Que ni siquiera es realizable del todo lo demuestra el hecho de que a veces resultó insalvable tal bilocación para más de un tema (cerebro dividido; privación en monos, etc., etc.). Que no es opuesto a la ética editorial más exigente lo evidencia el que cuando no se procede así se obliga con ello a más de uno para que adquiera algún volumen tal vez por uno solo de sus trabajos. Debería, pues, adoptarse el criterio de incluir en cada tomo, sin abuso pero con despreocupada amplitud, todo lo excelente que se refiera al tema, al margen por completo de si parte de ello irá también o no en otro volumen con temas afines.

Tanto en la revista como en estas selecciones, se incluyen siempre, en su versión original, breves semblanzas de los autores y una indicación muy escueta de obras cualificadas sobre el tema, en la fecha en que éste se publicó. Es un desacierto, fácilmente subsanable, el no haber incluido ese brevísimo apéndice biobibliográfico, que aclara al lector "Who is Who" entre tanta firma prestigiada, y le señala algún texto valioso.

Por lo demás, *la traducción es muy buena,* lo cual hay que destacar, para felicitar a los realizadores bajo la supervisión del profesor Pelechano, y para congratulación de todos. En este terreno es, además, doblemente destacable y meritorio el hecho, primero porque es imprescindible: el vocabulario psicobiológico está muy hecho y no admite ignorancias ni falsos inventos; segundo porque casi todos los textos de psicología fisiológica que hasta ahora se han editado traducidos, quedan entre malos y pésimos en español, al haberse vertido pasajes que son claves para la comprensión, oscilando entre la ambigüedad y la auténtica ininteligibilidad, sin que falten casos hasta de verdadera contradicción, no imputable, claro está, al original, sino al que pretendió traducirlo sin entenderlo o sin dominar los verdaderos equivalentes en nuestro lenguaje.

Claro está, sin embargo, que por algo calificó Ortega de "imposible" el oficio del traductor. Esta aporía intrínseca, y los consabidos "duendes" de las imprentas hacen imposible evitar pequeñeces que solemos advertir únicamente cuando nos llega la impresión definitiva y ya no tienen remedio. Tan sólo en este ínfimo e irrelevante orden de lo que casi son simples erratas cabría decir algo que nunca llega a reparo. Botoncillo de tal índole sería, por ejemplo, la expresión "específicos para cada especie" (pág. 46), que aunque quizá conste así en el original hubiera sido mejor evitarla. No mayor es la de escribir "el Dr. Brazier" (pág. 86) en vez de "la Dra. Brazier", puesto que poquísimas líneas antes se ha dicho que su nombre es Mary; el artículo inglés nos la juega en esto, como es bien sabido, cada dos por tres. Menos entidad cabe dar todavía a que se sigle SAR (pág. 99 y sigs.) lo que se ha titulado "formación", no "sistema", y es casi tópico abreviar hoy como FRAA en español. Que el pie de la figura a toda página, en la 102, quede confuso e incompleto, cuando el dibujo es claro y bueno resulta difícil averiguar a quién habría que achacarlo; como ocurre con el hecho de que en la inferior de las dos figuras situadas a la izquierda de la página 380, ninguna de las líneas que indican la localización del "septum" y del "hipotálamo" señalen claramente el lugar que realmente corresponde. En fin –para no cansar con minucias–, choca que se masculinice "el" LSD, tras haber aclarado que se trata de "la" diamida del ácido lisérgico (cuya sigla germánica se ha internacionalizado, y si no aclara esto no se sabe, por otra parte, de dónde sale). Cosillas así extrañan más cuando se comprueba que no se ha caído en corruptelas similares de difusión inatajable, como sería decir "el" ACTH y otras analogables, en las que no se incurre. Insistir en ello sería envanecerse buscando motas en ojo ajeno, cuando sólo alabanzas, y no pocas ni pequeñas merece. Quede, pues, bien clara la extraordinariamente meritoria labor que los traductores han realizado.

Como es bien conocido, los artículos, por lo general, no son excesivamente largos, aunque parecen con frecuencia más breves de lo que son, por el cuidado tipográfico que en eso se pone. La iconografía del SCIENTIFIC AMERICAN es famosa por lo abundante y asombrosamente grata y didáctica. Ediciones Blume ha mantenido en todo la excelente calidad editorial de origen.

En diversos puntos –muy pocos en verdad– se añaden en la versión leves indicaciones bibliográficas de la misma editorial, donde el lector pueda encontrar una conveniente puesta al día. Ello, y el que los traductores se hayan permitido añadir algún estudio actualizador, pese a todo insuficiente, me da pie para terminar con una propuesta que en cualquier caso estaba decidido a plantear. Se trata en esencia de algo tan simple como el intento de hacer valer un hecho evi-

dente: SCIENTIFIC AMERICAN y desde 1976 su adaptación española INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, han publicado ya trabajos recientes, similares a los que esta antología recoge, en número más que suficiente para hacer sin mayor esfuerzo un segundo volumen –*Psicología fisiológica II*– en su colección de selecciones. Con buena parte del ya aludido n.º 38 (noviembre, 1979) y entre lo publicado desde 1975 a 1980, puede escogerse con toda facilidad material de primera para un segundo volumen del mismo estilo, tan conveniente para profesores y alumnos de psicobiología humana. Resultaría del todo y por todo recomendable en un amplísimo sector, puesto que implica de suyo una múltiple condición que ningún otro texto circulante llena: la de servir a la vez de afianzamiento y ampliación de estudio, mediante la lectura directa de textos magistrales. Disponer de algo así, actualizado de lustro en lustro, puede ser sin duda algo realmente admirable, que los procedimientos actuales de impresión facilitan no poco, a mayor abundamiento.

Quede, pues, como cierre de esta recensión, el claro apoyo a la buenísima calidad de lo que se ha hecho, y el explícito deseo de inquietar a quien corresponda, para que un acierto tal no se interrumpa. (S. P.)

VITAMINA C, RESFRIADO COMUN Y GRIPE, por Linus Pauling. Editorial AC, Madrid, 1980. A Linus Pauling le fue concedido el premio Nobel de Química en 1954 y el de la Paz en 1962; cuatro años más tarde, a la edad de 65 años, el autor iniciaba una verdadera cruzada en favor de la vitamina C, cruzada dirigida contra los médicos "cuyas opiniones de segunda mano se limitan a repetir las afirmaciones de los expertos"; contra los investigadores médicos "que en ocasiones no han analizado profundamente sus propias investigaciones, ni han actuado de acuerdo con sus resultados"; contra las autoridades médicas por "afirmar que no existe demostración científica de que el consumo de dosis elevadas de vitamina C tenga efecto protector frente a diversas enfermedades o esté libre de contraindicaciones"; contra los autores de libros sobre nutrición "por no haber reflejado adecuadamente los datos referentes a la vitamina C"; contra los editores de revistas médicas y de divulgación y contra la estadounidense American Medical Association por mostrar, en definitiva, "prejuicios contra la vitamina C".

Pauling describe en la introducción del libro cómo surgió su interés por dicha vitamina. En 1976, Irwin Stone, un bioquímico con el que el autor había coincidido en un banquete, le escribió una carta en la que le expresaba su deseo de verle gozar de buena salud durante los próximos cincuenta años. Para ello le remitía un modelo de dieta con alto contenido en vitamina C. Pauling nos describe así los resultados obtenidos: "mi mujer y yo comenzamos el régimen recomendado por Stone y advertimos una creciente sensación de bienestar y, en especial, un notable descenso en el número de resfriados que contraíamos, así como en su intensidad". El fervor con que el autor ha mantenido desde entonces la campaña en favor de la vitamina C queda de manifiesto cuando escribe: "aunque resulte asombroso que alguien afirme que una sustancia puede resultar eficaz sea cual fuere la enfermedad que se padezca, existen muchos datos demostrativos de que la vitamina C es una sustancia de este tipo". Aparte de su efecto beneficioso en el resfriado común y la gripe, muchas otras enfermedades se benefician de la ingestión de vitamina C; entre ellas el autor recopila las siguientes: neumonía vírica, hepatitis, poliomielitis, tuberculosis, sarampión, parotiditis, varicela, meningitis vírica, herpes zoster, herpes simple, orquitis vírica, aftas, lepra, enfermedades cardiovasculares, fiebre reumática, alergias, esquizofrenia y cáncer. Acelera, además, la cicatrización de las heridas y tiene valor en la prevención del shock quirúrgico. Aumenta la capacidad para resistir ambientes fríos, ejerce un efecto beneficioso sobre la integridad de los discos intervertebrales, tiene valor para evitar el aborto y mejora las alteraciones menstruales. Se ha descrito también la existencia de una correlación positiva entre los niveles plasmáticos de vitamina C y el coeficiente intelectual. Cuando se ingieren dosis elevadas de la vitamina, incluso el exceso que no puede absorberse o la que se elimina por la orina ejercen también efectos beneficiosos en el tubo digestivo y en el tracto urinario. La vitamina C, afirma el autor, es inocua incluso tomada en grandes cantidades. Algunas personas deben ingerirla con algún alimento a fin de evitar su acción laxante; esta es, prácticamente, la única advertencia que se debe hacer. La ingestión de grandes dosis de vitamina C aumentaría la esperanza de vida, según la opinión de Pauling, entre doce y dieciocho años. Llevado por su entusiasmo afirma: "los analgésicos, antipiréticos, antihistamínicos, antitusígenos, broncodilatadores, antiespasmódicos y depresores del sistema nervioso central, que integran la mayoría de los medicamentos destinados a combatir el resfriado común en lugar de la advertencia 'manténgase esta medicina fuera del alcance de los niños', deberían llevar esta otra 'manténgase esta medicina fuera del alcance de todo el mundo y, en su lugar, utilícese vitamina C'".

Actualmente existe un acuerdo unánime en aceptar que basta una cantidad muy pequeña de vitamina C, unos 10 miligramos diarios, para evitar el escorbuto, y por esta razón los médicos y dietólogos opinan que no se precisan grandes cantidades de esta vitamina en la dieta, siendo la dosis generalmente recomendada para el adulto de 45 mg diarios. Sin embargo, Pauling considera que el consumo diario óptimo oscila entre 250 mg y 10 g, según los casos, dada la individualidad bioquímica de la especie humana. ¿En qué se basa el autor para recomendar dosis tan elevadas de vitamina C? Aparte de las acciones beneficiosas anteriormente citadas, Pauling aduce el hecho de que la mayoría de las especies animales son capaces de sintetizar en sus tejidos, especialmente en el hígado y el riñón, grandes cantidades de vitamina C. Sin embargo, el hombre y otros primates son incapaces de sintetizarla y necesitan ingerirla en la dieta. El cobaya y un murciélago de la India comedor de fruta son los otros únicos mamíferos conocidos que necesitan el ácido ascórbico en forma de vitamina. La mayoría de los animales (cabra, vaca, oveja, ratón, ardilla, conejo, gato, perro, etcétera) fabrican en sus tejidos cantidades equivalentes a diez gramos de vitamina C diarios por 70 kilogramos de peso corporal. Animales como el gorila, que no la sintetizan, ingieren en su dieta, consistente sobre todo en vegetación fresca, alrededor de 4,5 g de ácido ascórbico al día. No es sorprendente que el hombre requiera cantidades comparables en su alimentación.

La utilización terapéutica de altas dosis de vitamina C constituiría un ejemplo de aplicación de la medicina ortomolecular. Pauling define la medicina ortomolecular como aquella que procura conservar la salud y tratar las enfermedades haciendo variar en el cuerpo humano las concentraciones de sustancias que se hallan normalmente presentes en el mismo y que son precisas para la salud. Cita como ejemplos de medicina ortomolecular el tratamiento de las enfermedades carenciales con la ingestión adecuada de alimentos esenciales, el tratamiento de la diabetes con insulina, el de la fenilcetonuria o la galactosemia con dietas pobres en fenilalanina y lac-

tosa, respectivamente. En las enfermedades producidas por un déficit genético, el reemplazamiento del gen defectuoso por un gen intacto o la introducción de la correspondiente proteína deficitaria constituirían el remedio ortomolecular. En ciertas alteraciones genéticas, el enzima no se halla ausente, pero su actividad está disminuida y no se combina fácilmente con el correspondiente coenzima para constituir el enzima activo. En estos casos, puede mejorarse la situación aumentando exageradamente la concentración de coenzima con lo que, de acuerdo con los principios del equilibrio químico, podrá unirse una mayor proporción de apoenzima al coenzima, dando lugar, prácticamente, a una cantidad normal de enzima activo. Un ejemplo de enfermedad que puede controlarse de este modo es la aciduria metilmalónica. Los pacientes que sufren esta enfermedad presentan un déficit en el enzima que cataliza la conversión del ácido metilmalónico en ácido succínico; la vitamina B_{12} sirve como coenzima para esta reacción. Con la administración de cantidades muy elevadas de vitamina B_{12}, proporcionando concentraciones aproximadamente un millar de veces superiores a la normal, la velocidad de la reacción se normaliza en muchos pacientes. En opinión del autor existirían muchos casos de déficit enzimáticos menos dramáticos pero que también serían susceptibles de tratamiento con altas dosis de vitaminas. Evidentemente, curar las enfermedades corrigiendo las alteraciones cualitativas y cuantitativas del organismo a nivel molecular constituye el objetivo final de la medicina. En algunos casos específicos, como el citado de la aciduria metilmalónica, un tratamiento con dosis muy elevadas de una determinada vitamina, la llamada terapéutica megavitamínica, está justificado; pero sería convertir la medicina ortomolecular en medicina "megamolecular" extrapolar a priori de este hecho el que multitud de enfermedades por supuestos déficit enzimáticos podrían controlarse mediante la terapéutica megavitamínica.

El escollo fundamental con el que desgraciadamente tropezamos a la hora de valorar la eficacia terapéutica de la vitamina C es nuestra ignorancia sobre el mecanismo de acción de esta vitamina. Aunque Pauling afirma que la vitamina C se halla implicada prácticamente en todas las reacciones bioquímicas del organismo y en todos sus mecanismos protectores, lo cierto es que actualmente desconocemos esencialmente su mecanismo de acción. La vitamina C o ácido ascórbico es un agente intensamente reductor y es rápidamente convertido en ácido dehidroascórbico por agentes oxidantes. La reacción es reversible y es probable que el poder reductor del ácido ascórbico y el poder oxidante del ácido dehidroascórbico sean responsables de las propiedades fisiológicas de la vitamina. La vitamina C es necesaria para la síntesis del colágeno. Esta proteína fibrosa tiene un contenido elevado del aminoácido hidroxiprolina. El ácido ascórbico es necesario para la reacción oxidativa que transforma la prolina del procolágeno en la hidroxiprolina del colágeno. Una de las funciones más importantes del colágeno consiste en reforzar el cemento intercelular que mantiene unidas las células de los tejidos. Esta acción sobre el cemento intercelular se ha invocado como uno de los mecanismos protectores de la vitamina C frente a las infecciones. Otro posible mecanismo consistiría en el estímulo de la inmunidad natural. Pauling formuló, en 1970, la hipótesis de que la vitamina C intervendría en la síntesis del interferón, una proteína que aumenta la resistencia frente a las infecciones víricas. Estos mecanismos podrían estar igualmente implicados en la supuesta acción anticancerígena de la vitamina C. El ácido ascórbico interviene, además, en la síntesis y secreción de las hormonas cortico-suprarrenales e hipofisarias, y de ello podría depender parte de su eficacia contra las situaciones de stress. Las acciones beneficiosas de la vitamina C sobre las enfermedades cardiovasculares se han atribuido a su acción antioxidante que evitaría la formación de peróxidos a partir de ácidos grasos insaturados y a la disminución del colesterol plasmático.

En 1937, Szent-Györgyi escribía: "las vitaminas, si son adecuadamente entendidas y aplicadas, nos ayudarán a reducir el sufrimiento humano en un grado que ni la más fantástica mente podría imaginar". Desgraciadamente, dada la influencia que la moda ejerce sobre los temas objeto de investigación científica, no es precisamente el tema de las vitaminas uno de los más afortunados en la actualidad. Como dice Pauling, no estaremos seguros de cuán grande es el valor terapéutico de la vitamina C hasta que se hayan realizado más estudios. Es posible que la lectura del libro de Pauling contagie su entusiasmo por la vitamina C y sería deseable que aumentara más que el consumo de la vitamina el interés por la investigación básica en este fascinante campo de la fisiología y la bioquímica. (C. M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL HUMUS

SOIL ORGANIC MATTER: ITS NATURE, ITS ROLE IN SOIL FORMATION AND IN SOIL FERTILITY. Segunda edición. M. M. Kononova. Pergamon Press, Oxford, 1966.

SOIL BIOCHEMISTRY, IV vol. A. D. McLaren *et al.*: Marcel Dekker, Inc., New York, 1967-1975.

SOIL ORGANIC MATTER AND ITS ROLE IN CROP PRODUCTION. F. E. Allison. Elsevier Scient. Publ. Co.; Amsterdam, 1973.

MANUAL DE EDAFOLOGIA. Ph. Duchaufour. Toray-Masson; Barcelona, 1975.

SOIL ORGANIC MATTER . M. Schnitzer y S. U. Khan. Elsevier Scient. Publ. Co.; Amsterdam, 1978.

EL COMPUTADOR SUPERCONDUCTOR

SUPERCONDUCTIVE TUNNELING AND APPLICATIONS. L. Solymar. John Wiley & Sons, Inc., 1972.

IBM JOURNAL OF RESEARCH AND DEVELOPMENT. vol. 24, n.º 2; marzo, 1980.

LA GRAVEDAD EN LA TEORIA CUANTICA

THE ROLE OF EQUIVALENCE IN QUANTUM MECHANICS. Daniel Greenberger en *Annals of Physics*, vol. 47, n.º 1, págs. 116-126; marzo, 1968.

MAGNETIC FIELD EFFECTS ON DYNAMICAL DIFFRACTION OF NEUTRONS BY PERFECT CRYSTALS. A. Zeilinger y C. G. Shull en *Physical Review B*, vol. *B*19, n.º 8, págs. 3957-3962; 15 de abril de 1979.

MIELINA

GLIAL CELLS AND THE CENTRAL MYELIN SHEATH. Richard P. Bunge en *Physiological Reviews*, vol. 48, n.º 1, págs. 197-251; enero, 1968.

MYELIN. Dirigido por Pierre Morell. Plenum Press, 1977.

PROTEINS OF MYELIN AND THEIR METABOLISM. Joyce A. Benjamins y Pierre Morell en *Neurochemical Research*, vol. 3, n.º 2, págs. 137-174; 1978.

BASIC NEUROCHEMISTRY. Dirigido por R. W. Albers, G. W. Siegel, R. Katzman y B. W. Agranoff. Little, Brown and Co., en prensa.

EVOLUCION QUIMICA DEL MANTO TERRESTRE

LAS ROCAS MAS ANTIGUAS Y LA ACRECION DE LOS CONTINENTES. Stephen Moorbath en *Investigación y Ciencia*, n.º 8, págs. 66-81; mayo, 1977.

THE ORIGIN OF THE EARTH AND THE MOON. Alfred E. Ringwood. Springer-Verlag, 1979.

GEOCHEMICAL AND COSMOCHEMICAL APPLICATIONS OF ND-ISOTOPE ANALYSIS. R. K. O'Nions, S. R. Carter, N. M. Evensen y P. J. Hamilton en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 7, págs. 11-38; 1979.

GEOCHEMICAL MODELING OF MANTLE DIFFERENTIATION AND CRUSTAL GROWTH. R. K. O'Nions, N. M. Evensen y P. J. Hamilton en *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, n.º B11, págs. 6091-6101; 10 de octubre de 1979.

CINEMATICA DEL CRECIMIENTO VEGETAL

PLANT ANATOMY. Katherine Esau. John Wiley & Sons, Inc., 1965.

MODELING OF PLANT GROWTH. R. O. Erickson en *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 27, págs. 407-434; 1976.

KINEMATICS OF PLANT GROWTH. Wendy Kuhn Silk y Ralph O. Erickson en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 76, págs. 481-501; 1979.

LOS ORIGENES DE LA MINERIA DEL COBRE EN EUROPA

THE BEGINNINGS OF METALLURGY: A NEW LOOK. Theodore A. Wertime en *Science*, vol. 182, n.º 4115, págs. 875-887; 30 de noviembre de 1973.

A HISTORY OF METALLURGY. R. F. Tylecote. Metals Society, London, 1976.

L'ÂGE DU BRONZE EN EUROPE BARBARE: DES MÉGALITHES AUX CELTES. Jacques Briard. Éditions des Hespérides, 1976.

EL ASUNTO DE LOS RAYOS N

SUR DE NOUVELLES SOURCES DE RADIATIONS SUSCEPTIBLES DE TRAVERSER LES MÉTAUX, LE BOIS, ETC., ET SUR DE NOUVELLES ACTIONS PRODUITES PAR CES RADIATIONS. R. Blondlot en *Comptes rendus hebdomaires des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 136, n.º 21, págs. 1227-1229; 25 de mayo de 1903.

ÉMISSION DE RAYONS N (RAYONS DE BLONDLOT) PAR L'ORGANISME HUMAIN, SPÉCIALEMENT PAR LES MUSCLES ET PAR LES NERFS. Aug. Charpentier en *Comptes rendus hebdomaires des séances de l'Académie des Sciencies*, vol. 137, n.º 23, págs. 1049-1051; 14 de diciembre de 1903.

CAS D'ÉMISSION DE RAYONS N APRÈS LA MORT. Augustin Charpentier en *Comptes rendus hebdomaires des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 138, n.º 22, págs. 1351-1352; 30 de mayo de 1904.

THE N-RAYS. R. W. Wood en *Nature*, vol. 70, n.º 1822, págs. 530-531; 29 de septiembre de 1904.

PHOTOGRAPHIC RECORDS OF THE ACTION OF N-RAYS. En *Scientific American*, vol. 93, n.º 16, pág. 299; 14 de octubre de 1905.

HOW TO TELL THE BIRDS FROM THE FLOWERS, AND OTHER WOODCUTS. Robert Williams Wood. Dover Publications, Inc., 1959.

JUEGOS MATEMATICOS

HANDCUFFED DESIGNS. Stephen H. Y. Hung y N. S. Mendelsohn en *Aequationes Mathematicae*, vol. 11, n.º 2/3, págs. 256-266; 1974.

PROJECTIVE SPACE WALK FOR KIRKMAN'S SCHOOLGIRLS. Sister Rita (Cordia) Ehrmann en *Mathematics Teacher*, vol. 68, n.º 1, págs. 64-69; enero, 1975.

THE NINE PRISONERS PROBLEM. Dame Kathleen Ollerenshaw y Sir Hermann Bondi en *Bulletin of the Institute of Mathematics and Its Applications*, vol. 14, n.º 5-6, págs. 121-143; mayo/junio, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

STEREOPSIS IN DYNAMIC VISUAL NOISE. C. William Tyler en *Nature*, vol. 250, n.º 5469, págs. 781-782; 30 de agosto de 1974.

COHERENT MOTION AND STEREOPSIS IN DYNAMIC VISUAL NOISE. Joseph J. Mezrich y Albert Rose en *Vision Research*, vol. 17, n.º 8, págs. 903-910; 1977.

STEREO MOVEMENT FOR INNER OCULAR DELAY IN DYNAMIC VISUAL NOISE: A RANDOM SPATIAL DISPARITY HYPOTHESIS. C. W. Tyler en *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, vol. 54, n.º 6, págs. 374-386; 1977.